



**Ana Margarida Domingues Brito da Mana**

Licenciada em Ciências da Engenharia Civil

## **Influência das cinzas volantes não conformes em argamassas de cal aérea**

Dissertação para obtenção do Grau Mestre em  
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientador: Fernando F. S. Pinho, Professor Doutor, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof<sup>a</sup>. Doutora Zuzana Dimitivavá

Arguente: Prof<sup>a</sup>. Doutora Maria Paulina Faria Rodrigues

Vogal: Prof. Doutor Fernando F. S. Pinho



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Dezembro de 2013**





**Ana Margarida Domingues Brito da Mana**

Licenciada em Ciências da Engenharia Civil

## **Influência das cinzas volantes não conformes em argamassas de cal aérea**

Dissertação para obtenção do Grau Mestre em  
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientador: Fernando F. S. Pinho, Professor Doutor, FCT-UNL



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Dezembro de 2013**



‘Copyright’ Ana Margarida Domingues Brito da Mana, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## AGRADECIMENTOS

Manifesto o meu reconhecimento:

Ao meu orientador, Professor Fernando Pinho, pelo tema proposto, por ser actual e abranger áreas do meu agrado. Pelo apoio, disponibilidade, orientação e confiança transmitidas durante o período de realização.

À professora Paulina Faria, pela simpatia de me fornecer documentos necessários para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Eng.º Vitor Silva, pelo interesse e disponibilidade sempre demonstrada para me ajudar nas dificuldades ocorridas durante a realização dos ensaios e elucidar em alguns assuntos.

À empresa Sociedade Gestora de Resíduos, SA, em especial ao Eng.º Rui Barros, pela disponibilização de material bibliográfico e pelo esclarecimento de algumas dúvidas.

Ao engenheiro Jorge Henriques da empresa (central termoeléctrica do Pego) pelo fornecimento das cinzas volantes e a informação necessária para a realização deste trabalho e, ainda, pela disponibilidade em receber-me, em responder a questões.

Ao Eng.º Victor Vermelhudo da empresa SECIL (Outão), pelo fornecimento do agregado fino normalizado.

Ao Eng.º Hugo Fernandes do DEC-FCT/UNL, pela elaboração das pastilhas quadradas utilizadas na presente campanha experimental.

Ao Sr. Jorge Silvério, do DEC-FCT/UNL, pelo apoio prestado na preparação de alguns ensaios realizados na presente dissertação.

À D. Carla Figueiredo e D. Maria da Luz, do DEC-FCT/UNL, pela simpatia, apoio, disponibilidade e paciência demonstradas.

Aos meus colegas, pelo espírito de entreajuda criado dentro do laboratório, em particular à Ana Barra e Rita Santos.

Aos meus amigos mais próximos e aos meus familiares, pelo apoio e paciência demonstrados ao longo destes anos.

Aos meus pais, os meus pilares, pelo apoio incondicional durante todo o meu percurso pessoal e académico.





## RESUMO

Perante a situação económica e ambiental actual, surge a necessidade de utilizar resíduos de construção e demolição e resíduos industriais, com vista a reduzir a deposição destes materiais em aterros e a limitar o consumo de matérias-primas. As cinzas volantes, produzidas em centrais termoeléctricas, são um dos exemplos de resíduos industriais. A sua utilização é corrente em composições de argamassas e betões, melhorando aspectos de sustentabilidade destes importantes materiais de construção. Contudo, de acordo com as normas em vigor, nem todas as cinzas volantes podem ser utilizadas na produção de betões e argamassas, sendo nesses casos, depositadas em aterro. Neste contexto, foi proposto, por uma empresa de gestão de resíduos, um estudo experimental sobre a viabilidade deste tipo de cinzas volantes (não conformes) em argamassas.

Numa primeira fase aborda-se o tema de um modo geral, onde se inclui a caracterização e a classificação das cinzas volantes, e apresentam-se trabalhos de investigação com argamassas homólogas. Posteriormente, apresenta-se uma campanha experimental que foi efectuada para caracterizar física e mecanicamente cinco argamassas de cal aérea, produzidas ao traço volumétrico 1:3 (ligante: agregado). Estas argamassas diferenciam-se na quantidade de ligante que é substituído, nas mesmas percentagens, por cinzas volantes conformes ou não conformes. Os resultados obtidos, são apresentados e discutidos, cruzando características e comparando com trabalhos de outros autores com argamassas homólogas.

**Termos chave:** Cinzas volantes conformes; cinzas volantes não conformes; cal aérea; areia normalizada; argamassa.



## ABSTRACT

Due to economic and environmental issues, the use of construction and demolition wastes and industrial wastes arises as a growing need. The aim is to reduce the deposition of these materials in landfills and limit the consumption of raw-materials. Among the industrial wastes, fly ashes produced in thermal electric plants are often used in mortars and concretes compositions, improving sustainability aspects related to these important building materials. However, according to existing standards, not all produced fly-ashes can be used as components of concrete or mortars, being discarded into landfills instead. In this context, a waste management company proposed an experimental study on the feasibility of the discarded fly ashes (non compliant) in non structural mortars.

In a first phase, a review on the characterization and classification of fly ashes was conducted and studies on homologous mortars were presented. Afterwards, an experimental campaign was undertaken in order to characterize physically and mechanically five mortar specimens. These were composed by standard sand, air-lime and different parts of compliant and non-compliant fly ashes and were produced with volumetric ratio of 1:3 (binder: aggregate). Finally, the results were presented and discussed by crossing properties and by comparing with results obtained by other authors.

**Keywords:** Compliant fly-ashes; non-compliant fly-ashes; air-lime; standard sand; mortar.



# **SIMBOLOGIA**

## **SIGLAS**

AN – Areia normalizada

ASTM – American Society for Testing and Materials

Ca – Cal aérea

CEN – Comité Européen de Normalisation

Co – Compacidade

CVC – Cinzas volantes conformes

CVNC – Cinzas volantes não conformes

DEC – Departamento de Engenharia Civil

EN – Norma europeia

EPUL – Empresa Pública de Urbanização de Lisboa

FCT – Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNL

Fe – Ficha de ensaio

IPQ – Instituto Português da Qualidade

ISEL – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa

IST – Instituto Superior Técnico

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

NP – Norma Portuguesa

REN – Rede Eléctrica Nacional

RCD – resíduos de construção e demolição

SA – sociedade anónima

SAEC – Secção Autónoma de Engenharia Civil

SGR – Sociedade Gestora de Resíduos

UA – Universidade de Aveiro

UL – Universidade Lisboa

UNL – Universidade Nova de Lisboa

WCED – World Commission on Environment and Development

## NOTAÇÕES LATINAS

A – área de contacto

$A_{\square}$  – área da pastilha quadrada

$A_{\circ}$  – área da pastilha circular

a/l – relação água/ligante

b – lado da secção quadrada do provete

Ba – baridade

C – compacidade; centígrado

Cc – coeficiente de absorção de água por capilaridade

cm – centímetro

D – máxima dimensão do agregado

DP – desvio padrão

d – mínima dimensão do agregado; diâmetro

dm – decímetro

$d_{med}$  – diâmetro médio

$E_{din}$  – módulo de elasticidade dinâmico

Esp – espalhamento

F – força de rotura

$F_c$  – força de rotura à compressão

$F_f$  – força de rotura à flexão

$f_0$  – frequência de ressonância longitudinal

g – grama; aceleração da gravidade

h – lado da secção quadrada do provete; hora

$H_r$  – humidade relativa

Hz – hertz

Is – índice de secagem

Kg – quilograma

L – comprimento do provete

l – distância entre apoios do suporte do provete; litro

m – metro

mh – método hidrostático

min – minuto

ml – mililitro

mm – milímetro

M – massa do recipiente preenchido com o material

$M_0$  – massa do provete seco  
 $M_1$  – massa dos provetes imersos  
 $M_2$  – massa dos provetes saturados  
 $M_i$  – massa do provete no instante  $i$   
 $M_t$  – quantidade de água absorvida até o instante  $t$   
 $MF$  – módulo de finura  
 $MVA$  – massa volúmica aparente  
 $MVR$  – massa volúmica real  
 $MPa$  – mega pascal  
 $n^\circ$  – número  
 $N$  – newton  
 $pm$  – porosimetria de mercúrio  
 $P$  – pressão exercida  
 $Pa$  – pascal  
 $PA$  – porosidade aberta  
 $Re$  – retracção  
 $Q_i$  – teor de água do provete  
 $rpm$  – rotação por minuto  
 $R_c$  – resistência à compressão  
 $R_f$  – resistência à tracção por flexão  
 $s$  – segundos  
 $S$  – área da pastilha pastilhas; área da face em contacto com a água  
 $t$  – tempo  
 $T$  – temperatura  
 $T_s$  – taxa de secagem  
 $V$  – volume do recipiente  
 $VA$  – valor assintótico  
 $\%$  – percentagem  
 $^\circ$  – grau

## NOTAÇÕES ESCALARES GREGAS

$\rho$  – massa volúmica  
 $\theta$  – ângulo de contacto entre o mercúrio e as paredes dos poros  
 $\sigma$  – tensão superficial do mercúrio  
 $\sigma_a$  – tensão de aderência





# ÍNDICE

## Capítulo 1 - INTRODUÇÃO

1.1.	Considerações iniciais.....	1
1.2.	Objectivos e metodologia da dissertação .....	2
1.3.	Estrutura da dissertação .....	3

## Capítulo 2 - ENQUADRAMENTO DO TEMA

2.1.	Considerações iniciais.....	5
2.2.	Tipificação e variedade de argamassas .....	5
2.2.1.	Composição .....	6
2.2.2.	Produção .....	13
2.2.3.	Função .....	13
2.3.	Caracterização e classificação das cinzas volantes .....	15
2.3.1.	Caracterização .....	15
2.3.2.	Classificação.....	16
2.3.3.	Produção .....	17

## Capítulo 3 - TRABALHOS EXPERIMENTAIS DE REFERÊNCIA

3.1.	Considerações iniciais.....	21
3.2.	Trabalhos de investigação para comparação.....	21
3.3.	Síntese de trabalhos.....	33

## Capítulo 4 - CAMPANHA EXPERIMENTAL

4.1.	Considerações iniciais.....	35
4.2.	Materiais constituintes das argamassas .....	35
4.2.1.	Areia normalizada.....	35
4.2.2.	Cal aérea .....	36
4.2.3.	Cinzas volantes conformes e não conformes .....	36
4.2.4.	Água .....	36
4.3.	Ensaio de caracterização física dos materiais das argamassas .....	36
4.3.1.	Areia normalizada.....	37
4.3.2.	Cal aérea .....	40
4.3.3.	Cinzas volantes conformes .....	41
4.3.4.	Cinzas volantes não conformes .....	41
4.3.5.	Síntese de resultados.....	42
4.4.	Produção das argamassas .....	42

4.4.1.	Preparação das amassaduras .....	42
4.4.2.	Ensaio de caracterização das argamassas no estado fresco .....	44
4.4.3.	Execução e cura dos provetes.....	46
4.5.	Ensaio de caracterização das argamassas no estado endurecido.....	49
4.5.1.	Características físicas .....	51
4.5.2.	Características mecânicas.....	68
4.6.	Síntese dos resultados dos ensaios realizados .....	76
 <b>Capítulo 5 - ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS</b>		
5.1.	Considerações iniciais .....	79
5.2.	Caracterização das argamassas no estado endurecido .....	79
5.2.1.	Análise dos valores individuais.....	80
5.2.2.	Análise conjunta.....	94
5.3.	Comparação com trabalhos de outros autores .....	101
5.3.1.	Características físicas das argamassas.....	101
5.3.2.	Características mecânicas das argamassas .....	105
 <b>Capítulo 6 - CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b>		
6.1.	Considerações iniciais .....	109
6.2.	Conclusões e comentários finais.....	109
6.3.	Objectivos propostos e alcançados .....	111
6.4.	Desenvolvimentos futuros .....	111
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>		<b>113</b>
<b>ANEXO RESULTADOS.....</b>		<b>119</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Constituição e classificação das argamassas .....	6
Figura 2.2 – Central Termoeléctrica do Pego.....	18
Figura 2.3 – Esquema geral da central termoeléctrica e zonas de referência .....	20
Figura 3.1 – Distribuição dos poros das argamassas utilizadas no estudo de V. Rato .....	26
Figura 3.2 – Distribuição dos poros das argamassas utilizadas no estudo de Faria et al.....	28
Figura 3.3 – Distribuição dos poros das argamassas utilizadas no estudo de H. Paiva et al... ..	31
Figura 3.4 – Curvas de secagem das argamassas utilizadas no estudo de C. Barreto .....	32
Figura 3.5 – Curvas de secagem das argamassas utilizadas no estudo da I. Gomes et al.....	33
Figura 4.1 – Areia normalizada .....	35
Figura 4.2 – Cal aérea.....	36
Figura 4.3 – Cinzas volantes .....	36
Figura 4.4 – Ensaio de granulometria.....	38
Figura 4.5 – Curva granulométrica da areia normalizada .....	38
Figura 4.6 – Ensaio de determinação da baridade da areia .....	40
Figura 4.7 – Ensaio de determinação da baridade da cal aérea .....	40
Figura 4.8 – Ensaio de determinação da baridade da cinza volante conforme.....	41
Figura 4.9 – Ensaio de determinação da baridade da cinza volante não conforme .....	41
Figura 4.10 – Valores médios e desvios padrão dos materiais utilizados .....	42
Figura 4.11 – Preparação das argamassas .....	44
Figura 4.12 – Ensaio de consistência por espalhamento .....	45
Figura 4.13 – Moldagem e compactação dos provetes prismáticos .....	46
Figura 4.14 – Moldagem dos provetes para o ensaio de aderência .....	47
Figura 4.15 – Provetes prismáticos nos moldes e provetes para o ensaio de aderência .....	48
Figura 4.16 – Provetes em ambiente de cura.....	48
Figura 4.17 – Provetes prismáticos .....	49
Figura 4.18 – Sequência de ensaios realizados a cada um dos tipos dos provetes .....	50
Figura 4.19 – Ensaio de absorção de água por capilaridade.....	54
Figura 4.20 – Curvas da absorção de água por capilaridade .....	55
Figura 4.21 – Resultados médios do ensaio de absorção de água por capilaridade na 1ª hora .....	55
Figura 4.22 – Fases do processo de secagem .....	57
Figura 4.23 – Curva típica de secagem de materiais porosos.....	58
Figura 4.24 – Ensaio de secagem .....	59
Figura 4.25 – Curvas de secagem.....	60
Figura 4.26 – Ensaio de determinação das massas volúmicas .....	62

Figura 4.27 – Porosimetria de mercúrio da argamassa A0 .....	66
Figura 4.28 – Porosimetria de mercúrio da argamassa A1 .....	66
Figura 4.29 – Porosimetria de mercúrio da argamassa A2 .....	67
Figura 4.30 – Porosimetria de mercúrio da argamassa A3 .....	67
Figura 4.31 – Porosimetria de mercúrio da argamassa A4 .....	67
Figura 4.32 – Ensaio do módulo de elasticidade dinâmico.....	69
Figura 4.33 – Ensaio de resistência à flexão.....	71
Figura 4.34 – Ensaio de resistência à compressão .....	72
Figura 4.35 – Ensaio de aderência .....	74
Figura 4.36 – Provetes depois da aplicação da tensão máxima .....	75
Figura 5.1 – Retracção dos provetes ensaiados.....	80
Figura 5.2 – Coeficiente de capilaridade dos provetes ensaiados .....	81
Figura 5.3 – Valor assíntótico dos provetes ensaiados .....	82
Figura 5.4 – Taxa de secagem dos provetes ensaiados .....	83
Figura 5.5 – Índice de secagem dos provetes ensaiados .....	85
Figura 5.6 – Massas volúmicas reais e aparentes das argamassas ensaiadas .....	86
Figura 5.7 – Porosidade aberta das argamassas ensaiadas .....	87
Figura 5.8 – Distribuição dos poros das argamassas ensaiadas .....	88
Figura 5.9 – Comparação entre o método hidrostático e porosimetria de mercúrio .....	90
Figura 5.10 – Módulo de elasticidade dos provetes ensaiados .....	91
Figura 5.11 – Resistência à tracção por flexão dos provetes ensaiados.....	92
Figura 5.12 – Tensão de aderência dos provetes ensaiados .....	94
Figura 5.13 – Porosidade, índice de secagem e valor assíntótico das argamassas ensaiadas .....	95
Figura 5.14 – Coeficiente de capilaridade e taxa de secagem das argamassas ensaiadas.....	96
Figura 5.15 – Módulo de elasticidade, compacidade, massa volúmica das argamassas ensaiadas .....	99
Figura 5.16 – Resistências mecânicas e porosidade aberta das argamassas ensaiadas .....	100
Figura 5.17 – Resistências mecânicas das argamassas ensaiadas .....	101
Figura 5.18 – Resultados obtidos do coeficiente de capilaridade das argamassas de cal aérea... ..	102
Figura 5.19 – Resultados obtidos do coeficiente de capilaridade .....	102
Figura 5.20 – Resultados obtidos do valor assíntótico.....	103
Figura 5.21 – Resultados obtidos no ensaio das massas volúmicas das argamassas de cal aérea .....	104
Figura 5.22 – Resultados obtidos do ensaio de porosidade das argamassas de cal aérea .....	105
Figura 5.23 – Resultados obtidos do ensaio do módulo de elasticidade .....	106
Figura 5.24 – Resultados obtidos dos ensaios das resistências mecânicas .....	107

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Designação do agregado de acordo com as características indicadas..	7
Tabela 2.2 – Pozolanas naturais e artificiais	11
Tabela 2.3 – Funções e observações de cada uma das camadas.....	14
Tabela 2.4 – Limites de perda ao fogo para betão, cimentos correntes e pozolanas.....	17
Tabela 2.5 – Cinzas volantes utilizadas na presente dissertação.....	17
Tabela 3.1 – Trabalhos de experimentais de “ referência” .....	22
Tabela 3.2 – Caracterização física dos materiais utilizados no estudo da P. Faria.....	23
Tabela 3.3 – Caracterização da argamassa de cal aérea ao traço volumétrico 1:3 estudas por P. Faria.....	23
Tabela 3.4 – Caracterização da argamassa de cal aérea e cinzas volantes ao traço volumétrico 1:0,5:3 utilizada no estudo de P. Faria.....	23
Tabela 3.5 – Caracterização da argamassa de cal aérea e cinzas volantes ao traço volumétrico 1:1:4 utilizada no estudo de P. Faria.....	23
Tabela 3.6 – Caracterização da argamassa de cal aérea e cinzas volantes ao traço volumétrico 1:1,5:5 utilizada no estudo de P. Faria .....	24
Tabela 3.7 – Caracterização da argamassa de cal aérea ao traço volumétrico 1:3 utilizada no estudo de A. Velosa.....	24
Tabela 3.8 – Caracterização da argamassa de cal aérea e cinzas volantes ao traço volumétrico 1:1:4 utilizada no estudo de A. Velosa .....	24
Tabela 3.9 – Caracterização da argamassa de cal aérea ao traço volumétrico 1:3 utilizada no estudo de R. Vasco .....	25
Tabela 3.10 – Caracterização da argamassa de cal aérea ao traço volumétrico 1:3 utilizada no estudo de C. Guerreiro <i>et al</i> .....	26
Tabela 3.11 – Caracterização física da areia de rio utilizada no estudo de F. Pinho .....	27
Tabela 3.12 – Caracterização da argamassa de cal aérea ao traço volumétrico 1:3 utilizada no estudo de F. Pinho .....	27
Tabela 3.13 – Caracterização física dos materiais utilizados no estudo de C. Agostinho.....	28
Tabela 3.14 – Caracterização da argamassa de cal aérea ao traço volumétrico 1:3 utilizada no estudo de C. Agostinho .....	29
Tabela 3.15 – Caracterização física dos materiais utilizados no estudo de I. Santos .....	29
Tabela 3.16 – Caracterização da argamassa de cal aérea e cinzas volantes ao traço volumétrico 1:0,5:8 utilizada no estudo de I. Santos .....	30
Tabela 3.17 – Caracterização da argamassa de cal aérea e cinzas volantes ao traço volumétrico 1:1:8 utilizada no estudo de I. Santos. ....	30

Tabela 3.18 – Caracterização da argamassa de cal aérea ao traço volumétrico 1:3 utilizada no estudo de H. Paiva <i>et al.</i> ....	30
Tabela 3.19 – Caracterização física dos materiais utilizadas no estudo de C. Barreto .....	32
Tabela 3.20 – Caracterização da argamassa de cal aérea ao traço volumétrico 1:3 utilizada no estudo de C. Barreto .....	32
Tabela 3.21 – Síntese dos resultados obtidos por cada autor .....	33
Tabela 4.1 – Características físicas da areia normalizada .....	39
Tabela 4.2 – Proporções utilizadas na produção das argamassas .....	42
Tabela 4.3 – Composição ponderal das cinco argamassas .....	43
Tabela 4.4 – Quantidade de água e razão a/l .....	44
Tabela 4.5 – Valores médios de espalhamento das argamassas frescas .....	45
Tabela 4.6 – Resultados de retracção de cada provete ensaiado .....	52
Tabela 4.7 – Coeficientes de capilaridade e valores assintóticos médios e desvios padrão das argamassas ensaiadas .....	56
Tabela 4.8 – Índice de secagem e da taxa de secagem dos “meios provetes” e dos provetes inteiros .....	61
Tabela 4.9 – Massas volúmicas e porosidade aberta médias e desvios padrão das argamassas ensaiadas .....	63
Tabela 4.10 – Massas volúmicas e porosidade aberta obtidos no ensaio de porosimetria de mercúrio .....	68
Tabela 4.11 – Módulos de elasticidade médios e desvios padrão das argamassas ensaiadas .....	70
Tabela 4.12 – Resistências mecânicas médias e desvios padrão das argamassas ensaiadas .....	72
Tabela 4.13 – Tensões médias de aderência e desvios padrão das argamassas ensaiadas .....	75
Tabela 4.14 – Tipologia de rotura dos provetes estudados .....	76
Tabela 4.15 – Resultados das características físicas dos materiais .....	76
Tabela 4.16 – Resultados das características físicas dos provetes .....	76
Tabela 4.17 – Resultados das características mecânicas dos provetes .....	77

# Capítulo 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. Considerações iniciais

Nas últimas décadas, a sociedade tem vindo a consciencializar-se de que é necessário moderar a utilização/consumo dos recursos naturais. Assim sendo, a sustentabilidade tem adquirido uma importância cada vez maior em diferentes áreas, nomeadamente na indústria construção. Considera-se que uma construção sustentável procura satisfazer as necessidades da geração actual, sem pôr em risco a oportunidade das gerações futuras satisfazerem também as suas necessidades (WCED, 1987).

A construção mostrou-se nos últimos tempos o maior e mais activo sector em toda a Europa, tendo sido responsável por um elevado consumo de matérias-primas e energia e, ainda, pela produção de resíduos de demolições da construção, RCD. Neste sentido, o sector da construção tem vindo a sensibilizar-se para a reciclagem dos resíduos (RCD) que produz e para o aproveitamento de resíduos industriais e agrícolas. O interesse crescente em utilizar materiais como casca do arroz, cana de açúcar, resíduos sólidos urbanos e cinzas volantes, tem vindo a aliviar um encargo, tanto a nível económico como ambiental. Dos materiais mencionados anteriormente, o mais corrente no sector da construção são as cinzas volantes (Iyer *et al.*, 2001; Torgal *et al.*, 2007).

As cinzas volantes são libertadas e captadas por precipitação electrostática durante a queima do carvão, utilizado para a produção de energia eléctrica nas centrais termoelectricas, a fim de evitar/minimizar a poluição na atmosfera. Estes resíduos industriais, devido à sua actividade pozolânica, permitem melhorar as propriedades das argamassas e dos betões, classificando-se por isso, como aditivos ou adições. Outros exemplos de materiais, onde se adicionam cinzas volantes são: os ladrilhos, blocos e tijolos de cimento (Sabadot *et al.*, 2011; Siqueira, 2011).

O uso das cinzas volantes permite a substituição parcial dos ligantes nos betões e nas argamassas, possibilitando assim a diminuição da quantidade de ligante. Esta substituição contribui para a redução de produção e, consequentemente, o consumo do ligante. Porém, não deve comprometer o desempenho das argamassas e dos betões, nomeadamente na sua resistência mecânica. O

fabrico do ligante está relacionado com um elevado nível de consumo de energia, provocando elevadas quantidades de emissões de dióxido de carbono para atmosfera. Devido às elevadas quantidades empregues na construção, as argamassas e os betões são materiais adequados para a integração de resíduos e de subprodutos industriais. Logo, sempre que possível, a substituição parcial de ligantes por cinzas volantes é extremamente vantajosa sob os pontos de vista económico, eficiência energética e benefícios ecológicos e ambientais (Mehta e Malhotra, citadas por Camões, 2005).

No entanto, nem todas as cinzas volantes produzidas nas Centrais termoeléctricas podem ser utilizadas em argamassas e betões. Com efeito, as cinzas volantes são submetidas a vários ensaios, entre os quais o ensaio de perda ao fogo (propriedade química) para quantificar a percentagem de carbono livre (teor de inqueimados). A partir desta percentagem pode-se determinar a qualidade das cinzas volantes. A Norma NP 4220 2010 indica o valor limite máximo de perda ao fogo para utilização de pozolanas para betão, argamassa e caldas, a Norma NP EN 197-1 2001 estabelece o valor limite que permite a utilização das cinzas volantes em cimentos correntes e a Norma NP EN 450-1:2012 classifica em categorias o betão consoante a percentagem de carbono livre (IPQ, 2001; IPQ, 2010; IPQ, 2012; Santos, 2009).

As cinzas volantes que ultrapassam os valores característicos referidos nestas Normas são depositadas em aterro com custos adicionais para as centrais, tais como: a ocupação do terreno, custos ambientais (contaminação do solo), a necessidade de rega no período do Verão a fim de impedir a dispersão das cinzas pela atmosfera, etc.

Neste contexto, a presente dissertação, com o tema “Influência das cinzas volantes não conformes em argamassas de cal aérea”, faz uma análise comparativa entre cinzas volantes “conformes” e “não conformes” (valores referidos na secção 2.3), no comportamento de argamassas de cal aérea.

## **1.2. Objectivos e metodologia da dissertação**

A presente dissertação foi realizada no âmbito de um trabalho de investigação proposto pela empresa de gestão de resíduos (RCD) – Sociedade Gestora de Resíduos, S.A. com vista a um possível protocolo com a FCT/UNL e teve como principal objectivo o estudo de características físicas e mecânicas das argamassas constituídas por cinzas volantes não conformes. Nesse sentido, formularam-se cinco tipos de argamassas diferentes: uma argamassa de referência (sem cinzas volantes), duas com cinzas volantes conformes, variando a sua percentagem, e mais duas com cinzas volantes não conformes, nas mesmas proporções das argamassas com cinzas volantes conformes (percentagens referidas na tabela 4.3 da secção 4.4).

As cinzas volantes conformes e não conformes utilizadas neste trabalho foram produzidas na Central Termoeléctrica do Pego (unidade de produção de energia eléctrica convencional).

A campanha experimental, iniciou-se com a realização de ensaios para a caracterização física dos elementos constituintes das argamassas (cinzas volantes conformes e não conformes, areia



normalizada e cal aérea). Posteriormente, efectuaram-se ensaios de caracterização física e mecânica das argamassas endurecidas.

Por fim, os resultados obtidos da campanha experimental serão analisados e comparados com outros de argamassas semelhantes, ao mesmo traço (e, nalgumas situações, constituídas também por cinzas volantes conformes).

### 1.3. Estrutura da dissertação

Este trabalho é constituído por seis capítulos, incluído o presente, e um anexo, organizados da seguinte forma:

- No **Capítulo 2** descreve-se as argamassas de uma forma generalizada, incluindo os seus constituintes, e referem-se as suas diferentes aplicações. Explica-se ainda o modo de obtenção das cinzas volantes (conformes e não conformes), a sua caracterização e classificação.
- No **Capítulo 3** apresenta-se uma revisão bibliográfica referente a trabalhos de investigação semelhantes ao caso de estudo.
- No **Capítulo 4** descrevem-se os procedimentos de ensaio realizados para caracterização dos constituintes e das argamassas.
- No **Capítulo 5** analisa-se com detalhe os resultados obtidos na presente campanha experimental, individualmente e “cruzando” as diferentes características (físicas e mecânicas). Além disso, comparam-se os valores obtidos na pesquisa bibliográfica (Capítulo 3) com os resultados obtidos nesta campanha experimental (Capítulo 5).
- No **Capítulo 6** apresentam-se as principais conclusões obtidas, confrontam-se os objectivos realizados com os previstos e referem-se alguns desenvolvimentos futuros.
- No **Anexo - resultados** apresentam-se os resultados obtidos na campanha experimental dos constituintes e das argamassas.

Todas as fotografias não referenciadas bibliograficamente são da responsabilidade do autor.



## Capítulo 2

### ENQUADRAMENTO DO TEMA

#### 2.1. Considerações iniciais

Neste capítulo, faz-se o enquadramento do tema da presente dissertação. Neste sentido, começa-se por apresentar os diferentes tipos de argamassas e os seus constituintes. De seguida, centra-se o estudo nas cinzas volantes, apresentando-se o seu processo de produção, as suas principais características e a sua classificação (conformes e não conformes).

O enquadramento teórico do tema é completado /complementado com o Capítulo 3, onde se referem alguns trabalhos de investigação realizados por outros autores.

#### 2.2. Tipificação e variedade de argamassas

As argamassas surgiram há cerca de 10000 anos, numa povoação da Galileia (actual Estado de Israel). No período de 8000-7000 aC., as argamassas usadas na construção tinham como ligantes a cal e o gesso, como foi comprovado em algumas estátuas em Jericó (antiga cidade bíblica da Palestina). Por esta altura, na Turquia, utilizava-se gesso no reboco de paredes. Até ao império Romano persistiu o uso de argamassas de cal e areia; no entanto, nesta época foram criadas argamassas à base de cal e pozolana (pó de tijolo ou cinzas vulcânicas). Estas argamassas destinavam-se a aplicações em que a presença de água não permitia o uso adequado de argamassa apenas de cal. Exemplos dessas aplicações são as cisternas e os aquedutos (Alvarez *et al.*, 2005; Graymont, n.d.).

As argamassas têm sido imprescindíveis na construção. Contudo, foram melhoradas e aperfeiçoadas de acordo com as necessidades técnicas de cada época. Actualmente a sua utilização estende-se também a trabalhos de reabilitação dos edifícios antigos.

Em geral, uma argamassa é definida tendo em conta a sua composição, produção e função, como se representa na figura 2.1.

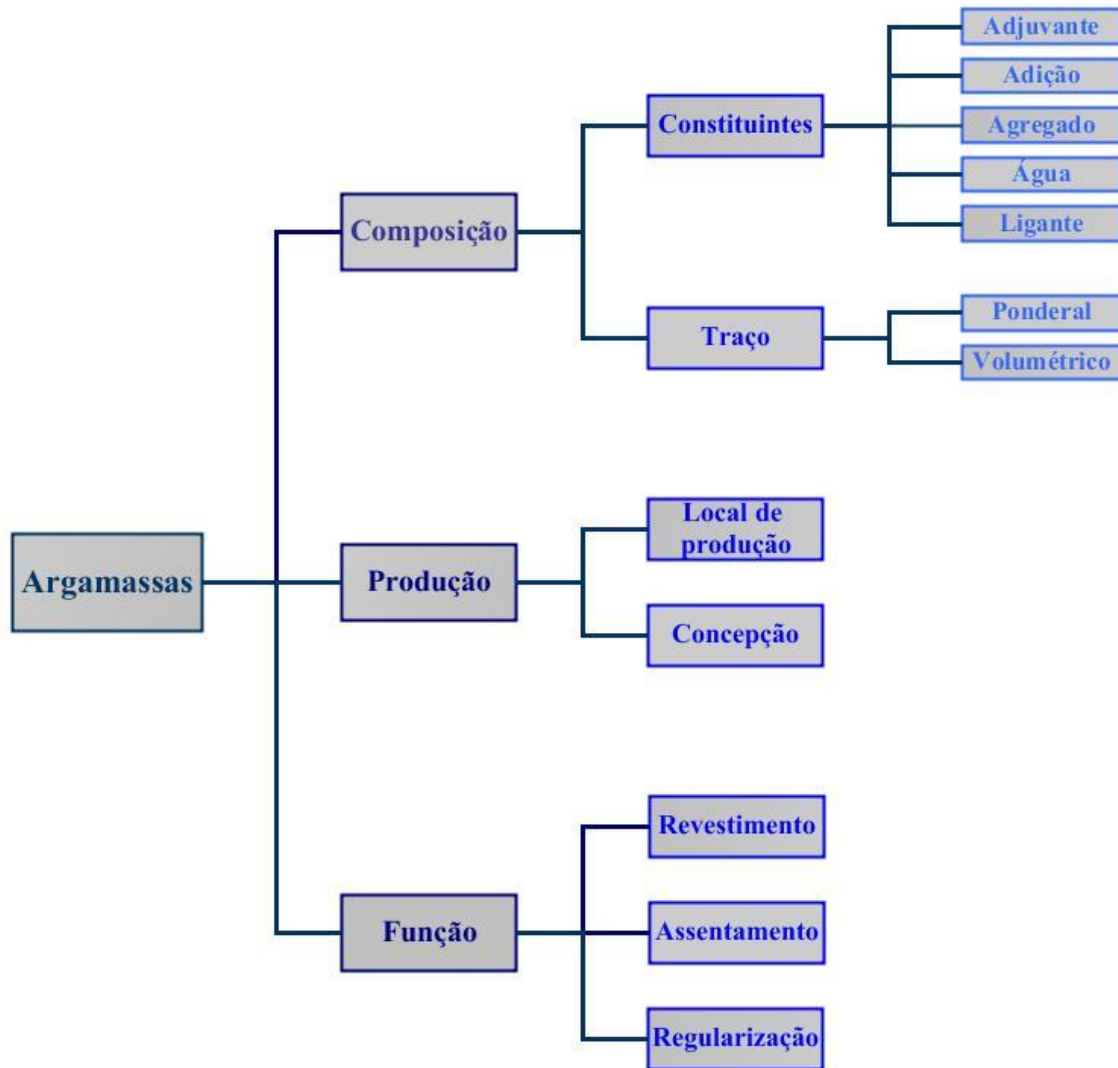


Figura 2.1 – Constituição e classificação das argamassas

Nos pontos seguintes aborda-se cada um dos tópicos anteriores.

### 2.2.1. Composição

Na composição abordam-se os constituintes e os traços que se utilizam na produção das argamassas.

#### *Constituintes*

Os constituintes que compõem uma argamassa (mistura homogênea) são: agregados, ligantes, água e, nalguns casos, aditivos e/ou adjuvantes.

- **Agregado**

O agregado, constituinte da argamassa, é um material granular fino. Este material classifica-se de acordo com: petrografia, origem, baridade, dimensão e forma das partículas (Sousa-Coutinho, 1988). Na tabela 2.1, apresenta-se a classificação do agregado segundo estas características.

Tabela 2.1 – Designação do agregado de acordo com as características indicadas  
(Sousa-Coutinho, 1988;IPQ, 2007)

Características	Designação
<b>Petrografia<sup>(1)</sup></b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ígneas</li> <li>• Sedimentares</li> <li>• Metamórficas</li> </ul>
<b>Origem</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Natural (areia, godo e brita)</li> <li>• Artificial - obtido através de processos industriais (argila expandida e xisto expandido)</li> <li>• Reciclado - resultante da trituração de materiais já utilizados (resíduos da construção e demolição-RCD)</li> </ul>
<b>Baridade</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ultraleve (<math>Ba &lt; 300 \text{ kg/m}^3</math>)</li> <li>• Leve (<math>300 \text{ kg/m}^3 \leq Ba \leq 1200 \text{ kg/m}^3</math>)</li> <li>• Denso (<math>1200 \text{ kg/m}^3 &lt; Ba \leq 1700 \text{ kg/m}^3</math>)</li> <li>• Extradenso (<math>Ba &gt; 1700 \text{ kg/m}^3</math>)</li> </ul>
<b>Dimensão das partículas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Finos – passam no peneiro nº4, <math>\# &lt; 4,76\text{mm}</math> (ex.: areia)</li> <li>• Grossos - não passam no peneiro nº4, <math>\# &gt; 4,76\text{mm}</math> (ex.: brita)</li> </ul>
<b>Forma das partículas<sup>(2)</sup></b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Angular</li> <li>• Esférica<sup>(3)</sup></li> </ul>

<sup>(1)</sup> Refere-se apenas a rochas naturais.

<sup>(2)</sup> Influencia a resistência mecânica. A forma é avaliada a partir do coeficiente volumétrico que relaciona o volume da partícula e o volume mínimo da esfera capaz de envolver a partícula. O limite superior é 1, que caracteriza a partícula como sendo esférica.

<sup>(3)</sup> A forma esférica permite que as partículas se agrupem melhor, possibilitando uma maior compacidade e consequentemente uma melhor resistência mecânica.

Na presente dissertação o agregado utilizado foi a areia fina normalizada (siliciosa). A areia é um agregado fino, de origem natural, constituído por elementos finos e por pequenos grãos. Este agregado, dependendo da sua proveniência, classifica-se em areia siliciosa (rio) ou areia argilosa (areeiro) ou ainda em areia calcária (originadas pela britagem do material retirado das pedreiras). A forma das partículas e a granulometria são duas características que influenciam a constituição e o desempenho das argamassas. A forma está relacionada com a superfície específica da areia e, consequentemente, afecta a quantidade de água necessária para a produção das argamassas. A granulometria da areia deve ser escolhida de acordo com a função das argamassas; por exemplo em relação a um acabamento, quando se pretende um acabamento fino opta-se por uma areia mais fina. Outra condição da granulometria das areias é que deve ser contínua e equilibrada, isto é, constituída por partículas de diferentes dimensões, de modo a conferir compacidade e trabalhabilidade às argamassas. É de salientar que a areia tem diferentes comportamentos consoante a sua dimensão: a mais fina restringe a porosidade e a absorção de água, por oposição a mais grossa, que diminui a fendilhação. A areia não deve ter na sua constituição sais e matéria orgânica, deve ser estável ao ar, à água e a outros agentes externos; deve ter ainda uma boa compatibilidade com todos os constituintes das argamassas, de modo a obter a mistura desejada (Agostinho, 2008; Sousa-Coutinho, 1988; Faria, 2004; Rato, 2006).

- **Ligante**

O ligante é um material que tem como função aglomerar os agregados, conferindo-lhes coesão e resistência. Este material ganha presa (endurece) quando sujeito a determinadas condições (água, ar, reacções químicas, etc) (Sousa-Coutinho, 1988; Sousa-Coutinho, 2006).

A classificação do tipo de ligante está relacionada com a necessidade ou não de água no processo de endurecimento, designando-se por ligante hidrófilo ou ligante hidrófobo, respectivamente. O ligante hidrófilo é constituído por matéria sólida em forma de pó, que na presença da água, origina uma pasta, a qual endurece devido às reacções de hidratação. Este ligante pode classificar-se em aéreo e hidráulico. O primeiro tipo de ligante ganha presa apenas ao ar (carbonatação), ao contrário do segundo que tem a possibilidade de endurecer ao ar ou debaixo de água (hidratação). Os ligantes hidrófilos aplicam-se essencialmente em argamassas e em betões. Na produção de argamassas podem-se utilizar um ou mais ligantes, designando-se, neste caso, por argamassas bastardas.

O ligante hidrófobo é constituído por substâncias mais ou menos viscosas que endurecem por: arrefecimento, evaporação dos seus dissolventes ou reacção química entre os diferentes componentes. Este ligante não necessita de água para a sua produção e para o seu processo de endurecimento e, para além disso, “repele-a” após o endurecimento. Geralmente, aplica-se em impermeabilizações e pavimentos (ex.: betumes e asfaltos) (Sousa-Coutinho, 1988; Faria, 2004; Sousa-Coutinho, 2006).

Na presente dissertação, o ligante utilizado foi cal aérea. Esta resulta da decomposição, pela acção da temperatura, de uma rocha constituída por uma percentagem superior a 95% de carbonato de cálcio ou de cálcio e magnésio. A cal aérea é classificada em gorda e magra, a primeira resulta de calcários quase puros com quantidades de carbonato não inferiores a 99% e a segunda advem de calcários com teores de argila e de outras impurezas que variam entre 1 e 5%. Em algumas situações, o magnésio surge associado ao cálcio; nesses casos, a cal classifica-se magnesiana (óxido magnésio > 20%). Quando isso não acontece designa-se apenas por cal (Sousa-Coutinho, 1988).

O processo de obtenção de cal aérea divide-se nas seguintes fases: calcinação, hidratação (extinção da cal viva) e carbonatação, que são apresentadas em seguida. Na calcinação, o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), a uma temperatura aproximadamente de  $900^\circ\text{C}$ , decompõe-se em óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ), que corresponde à cal viva, e em dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), cujo processo é demonstrado pela equação 2.1 (Agostinho, 2008; IPQ, 2011; Sousa-Coutinho, 1988).



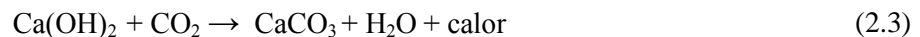
É de referir que, quando a cal aérea também é constituída por magnésio (cal dolomítica), o processo é idêntico, no entanto a temperatura é inferior. Quanto mais pura é a rocha, maior é a temperatura de reação (Faria, 2004; IPQ, 2011; Sousa-Coutinho, 1988).

O processo de hidratação do óxido de cálcio (cal viva) é necessário, uma vez que é um componente muito instável. Este processo designa-se por extinção da cal viva e pode ocorrer por imersão ou aspersão com água. A extinção da cal viva é tanto mais complicada quanto mais elevada for a temperatura de calcinação. A reacção química, na presença da água, corresponde à equação exotérmica 2.2 (Agostinho, 2008; Faria, 2004; Sousa-Coutinho, 1988).



O produto obtido é o hidróxido de cálcio, também designado por cal apagada ou hidratada. Esta cal está disponível em pó, pasta ou leite de cal (Agostinho, 2008; Faria, 2004; IPQ, 2011; Sousa-Coutinho, 1988).

A carbonatação, a última fase, ocorre quando a cal hidratada (hidróxido de cálcio) na presença do dióxido de carbono reconstitui a composição química de pedra que é oriunda, originado de novo carbonato de cálcio. A correspondente reacção é traduzida pela equação química 2.3, desenvolvendo-se do exterior para o interior da argamassa, ao longo de vários meses (Agostinho, 2008; Faria, 2004; Sousa-Coutinho, 1988).



No período de secagem da pasta de cal, geralmente, dá-se uma contração por fissuração, pelo que é preciso utilizar areia na argamassa. A areia não reage com a cal, mas coopera no endurecimento da argamassa e diminui a sua retracção. Os grãos da areia permitem dividir o material em pequenas fracções localizadas que arejam a argamassa, favorecendo a carbonatação ao mesmo tempo que se dá a secagem. Durante este processo (endurecimento), há libertação de água, por isso, deve-se introduzir a menor quantidade de água possível. O carbonato de cálcio, produto final, é o material que desenvolve resistência e contribui para a durabilidade da argamassa, originando o termo cal aérea (Agostinho, 2008; Faria, 2004; IPQ, 2011; Sousa-Coutinho, 1988; Sousa-Coutinho, 2006).

A argamassa de cal aérea caracteriza-se por ter: endurecimento lento, uma vez que, o dióxido de carbono tem que penetrar em toda a argamassa; estrutura friável; resistência mecânica e módulo de elasticidade baixos (Barra, 2011; Coelho *et al.*, 2010).

- **Adição**

A adição (ou aditivo) é um material inorgânico com uma finura inferior ou igual à do ligante. Este material acrescenta-se em proporções superiores a 5% da massa do ligante. A sua função é melhorar as propriedades das argamassas e dos betões, sem alterar a composição do(s) ligante(s)

(Sousa-Coutinho, 1988; Sousa-Coutinho, 2006; IPQ, 2007; IPQ, 2010). Porém, existem outras vantagens (Sousa-Coutinho, 2006; Sabedot *et al.*, 2011; Ferraz *et al.*, 2012):

- a substituição parcial do(s) ligante(s) por adições contribui para uma redução ou um inexistente gasto de energia, pois a preparação de adições consome muito menos energia ou nenhuma quando se trata de subprodutos industriais ou agrícolas.
- a redução do uso de(s) ligante(s) corresponde a uma menor emissão de CO<sub>2</sub>, gás que contribui para o efeito de estufa e, consequentemente, para as alterações climáticas.
- a utilização de subprodutos industriais e resíduos agrícolas como aditivos, permite valorizá-los em termos económicos (quantidade de ligante diminui) e evita impactos ambientais resultantes da sua deposição.
- conservação de produtos naturais (calcário e marga).

O aditivo divide-se em dois tipos (I e II): o tipo I refere-se a aditivos quase inertes (por exemplo: filer calcário) e o tipo II a aditivos que na presença da água e à temperatura ambiente, podem originar, com o hidróxido de cálcio, ou por si só, elementos parecidos aos obtidos na hidratação dos constituintes do clínquer Portland. Exemplos deste tipo são as escórias de alto-forno, sílica de fumo e as pozolanas (IPQ, 2010).

Na presente dissertação, o aditivo utilizado foi do tipo II - pozolana. Este tipo de aditivo pode ter origem natural ou artificial. O de origem natural é formado por rochas que só por si têm propriedades pozolânicas e não são sujeitas a nenhum tratamento, ao contrário do que acontece com o de origem artificial, em que as rochas sofrem um tratamento térmico próprio ou resultam de subprodutos artificiais. Apresentam-se na tabela 2.2 alguns exemplos do tipo de pozolana e a sua origem. A pozolana é essencialmente constituída por dióxido de silício (sílica) e por óxido de alumínio, sendo os restantes constituintes óxido de ferro e outros óxidos em pequena percentagem. O material pozolânico não tem por si só propriedades aglomerantes hidráulicas; porém quando finamente moído e na presença da água, à temperatura ambiente, reage com o hidróxido de cálcio e forma compostos de silicato e aluminato de cálcio, conferindo resistência. Estes compostos são semelhantes aos obtidos no processo de endurecimento dos materiais hidráulicos (cimento de Portland). A reacção que ocorre entre a pozolana e o hidróxido de cálcio na presença da água designa-se por reactividade pozolânica, sendo influenciada por diferentes factores: o tipo de pozolana (composição), superfície específica, temperatura de cozedura/formação, relação cal/pozolana, quantidade de água, condicionamento (temperatura/ humidade) e compactação (Sousa-Coutinho, 1988; Faria, 2004; IPQ, 2007; IPQ, 2010; IPQ, 2012; Velosa, 2006).



Tabela 2.2 – Pozolanas naturais e artificiais (Faria, 2004; Pontes, 2011; Velosa, 2006).

Tipo de pozolana	Designação/Exemplos	Observações
<b>Natural</b>	• Rochas vulcânicas incoerentes	• Obtidas de cinzas vulcânicas soltas ou consolidadas em tufo (Açores)
	• Materiais alterados de origem argilosa e mista	• Tratamento térmico de materiais como vulcanitos, detriticos ou diatomídeos.
	• Provenientes de materiais de origem sedimentar orgânica	• Rochas sedimentares
	• Argilas calcinadas naturalmente	• Argilas betuminosas ou gás de xisto, em contacto com o ar, auto-inflamam, provocando elevadas temperaturas, activando os minerais argilosos
	• Finos agregados siliciosos reactivos	• Advêm da moagem e da britagem de rochas siliciosas com quartzo deformado ou microcristalino
<b>Artificial</b>	• Metacaulino	• Tratamento térmico de argilas caulínicas, t=600°-850 ° C (caulinite resulta da alteração de rochas feldspáticas)
	• Argila expandida	• Resulta da expansão da argila natural num forno rotativo
	• Cinzas volantes	• Resultam da combustão do carvão nas centrais térmicas
	• Cinza Matéria orgânica (Biomassa, Casca de Arroz, Madeira, Cana de açúcar)	• Obtidas pela queima de materiais orgânicos, resíduos agro-industriais
	• Vidro Moído	• Gerado pela calcinação a altas temperaturas

O material pozolânico tem requisitos químicos e físicos que são especificados como valores característicos (critérios de aceitação) para se poder utilizar em cimentos, argamassas e betões. São exemplos de requisitos químicos: perda ao fogo, cloretos, trióxido de enxofre, álcalis, óxido de cálcio livre. São exemplos de requisitos físicos: finura, massa volúmica, tempo de início de presa, etc. A conformidade com os valores característicos deve ser realizada pelo produtor, seguindo o controlo de conformidade indicado nas normas. Os métodos de ensaio mencionados nas normas são métodos de referência. Contudo, podem ser realizados outros métodos desde que seja estabelecida a relação entre os resultados obtidos pelo método de referência e pelo método alternativo (IPQ, 2008; IPQ, 2010; IPQ 2012).

Actualmente, a preservação do património edificado Português é cada vez mais um objectivo do sector da engenharia civil, não só pela saturação da construção nova como também pela crescente necessidade de reabilitação do património edificado. Nesse sentido, as argamassas de reabilitação/substituição têm vindo a assumir um papel relevante. Este tipo de argamassas têm que ser compatíveis com os materiais aplicados antigamente e ao mesmo tempo têm que ser adequadas à prática construtiva contemporânea, usando os materiais disponíveis no mercado. Uma argamassa só de cal aérea apresenta a compatibilidade necessária com as alvenarias antigas; porém apresenta algumas limitações: em ambientes muito húmidos ou fracos de dióxido de carbono (lento, devido ao reduzido contacto com hidróxido de cálcio) ou pode ser condicionada

em locais sujeitos a fortes ataques de sais. Neste contexto, o uso de cal aérea com pozolanas tem sido objecto de estudo. A adição de componentes pozolânicos à argamassa cal aérea concede-lhe a possibilidade de ganhar presa também por reacções de hidratação (para além das reacções de carbonatação), resultando normalmente num aumento das resistências não só mecânicas, mas sobretudo face à acção dos sais solúveis, comuns em edifícios antigos (Almeida *et al.*, 2007; Faria, 2004; Faria *et al.*, 2006; Faria *et al.*, 2011; Gibbons, 1997).

As argamassas de cal com adições pozolânicas são uma opção interessante de aplicação, uma vez que permitem dar resposta a duas áreas que estão em desenvolvimento: a sustentabilidade e a reabilitação (Velosa, 2006).

Neste trabalho, utilizou-se como pozolanas artificiais: as cinzas volantes (apresentada na secção 2.3).

- **Adjuvante**

O adjuvante é um material que permite melhorar ou ajustar determinadas características da argamassa, no estado líquido ou no estado endurecido. Este material é adicionado à argamassa durante a amassadura. A sua função e o momento da adição são comuns à do aditivo; porém, a quantidade introduzida é diferente, sendo no caso do adjuvante inferior a 5% da massa do ligante. A classificação do adjuvante está relacionada com a sua acção principal: reologia, teor de ar, presa, resistência a acções físicas, químicas e biológicas e cor. São exemplos de adjuvantes: retentores de água, plastificantes (diminui a quantidade de água necessária), introdutores de ar, aceleradores e retardadores de presa, anticongelantes, pigmentos, etc (Sousa-Coutinho, 1988; IPQ, 2007; Seabra *et al.*, 2007).

- **Água**

A água é um elemento imprescindível na elaboração da argamassa, pois só na sua presença é que os ligantes hidrófilos (aéreos ou hidráulicos) adquirem propriedades aglutinantes (Pavão, 2010). Este elemento, quando provem da distribuição para o consumo público (potável), permite que não haja desconfiças ao nível da sua qualidade. Nos casos em que a água não é potável deve-se ter em consideração a sua constituição, porque pode ter impurezas e sais solúveis prejudiciais às características/ propriedades da argamassa. Para além da composição da água, a sua quantidade é outro factor relevante. Assim sendo, deve utilizar-se a quantidade de água adequada, nem em excesso, nem em défice, de modo a contribuir para a consistência, processo de endurecimento, aderência ao suporte, características no estado endurecido e qualidade final da argamassa (Agostinho, 2008; Sousa-Coutinho, 1988; Pavão, 2010).

A relação água/ligante é muito importante no comportamento da argamassa, por exemplo, quanto maior a quantidade de água, maior a percentagem de porosidade, logo menor resistência à compressão (Papayianni *et al.*, 2006).

A quantidade de água a usar na argamassa de cal e de pozolana deverá ser 32% do peso da cal e pozolana para hidratar os silicatos e os hidratos (Sousa-Coutinho, 1988).

***Traço***

O traço duma argamassa é muito importante porque, a partir dele, conhece-se a relação percentual entre os componentes (ligante (s), agregado(s) e aditivo) que constituem a argamassa. A opção do tipo de traço é variada; porém deve depender da função que a argamassa vai desempenhar, permitindo assim, que responda às suas solicitações. A proporção dos constituintes pode ser feita em massa – traço ponderal ou em volume – traço volumétrico. Este último é o mais utilizado em obra, devido à disponibilidade e facilidade de equipamento/recipientes no local (Dubaj, 2000; Martins *et al.*, 2010).

**2.2.2. Produção**

Quanto à produção de uma argamassa define-se: o local de produção e concepção.

***Local de produção***

De acordo com o lugar de produção, as argamassas podem-se dividir em três grupos: tradicionais – os constituintes primários (ligantes, agregados e água) são doseados e misturados em obra; industriais – os constituintes são doseados e misturados em fábrica, apresentando-se “em pó” (em obra adiciona-se apenas água) ou “em pasta” (pronta a aplicar) e industriais semi-acabadas – os constituintes são doseados em fábrica e fornecidos em obra: podendo ser pré-doseados, quando são misturados em obra segundo instruções e condições do fabricante ou pré-misturados, sempre que são adicionados, em obra, outros componentes que o fabricante especifica ou fornece (CEN, 2010; Paulo, 2006).

***Concepção***

Segundo a concepção, argamassa classifica-se em: argamassa de desempenho, quando a composição e o processo são definidos pelo fabricante de modo a alcançar propriedades específicas, e em argamassa de formulação, se o fabrico é segundo uma composição pré-determinada (as propriedades atingidas dependem da proporção dos componentes) (CEN, 2010; Paulo, 2006).

**2.2.3. Função**

Quanto à função da argamassa (característica que se deve ter em conta na produção) considera-se: assentamento, revestimento e regularização.

***Argamassa de assentamento***

Tem como principais funções: unir as “unidades” para formar elementos monolíticos (paredes); resistir a esforços mecânicos (perpendiculares e no plano da parede); distribuir as cargas actuantes uniformemente ao longo da alvenaria; absorver as deformações causadas pela variação térmica e pela retracção por secagem e fechar as juntas, assegurando a sua estanqueidade para impedir a

infiltração da água das chuvas. Neste sentido, esta argamassa deve apresentar determinadas características tais como: capacidade de aderência (resistir à compressão e absorver deformações), durabilidade, eficiência em relação à produção e economia (Pereira *et al.*, 2010).

### **Argamassa de revestimento (reboco)**

Tem como funções: atribuir aspecto estético ao edifício (paredes e tectos); contribuir para a proteção das paredes (interiores e exteriores) contra agentes de degradação; conferir conforto térmico e acústico; permitir a regularização das alvenarias e a impermeabilização nos revestimentos exteriores. Os agentes de degradação resultam da acção externa (intempéries); da acção de químicos da poluição e dos sais solúveis contidos nos materiais (água e solo) e acção mecânica ao choque. Esta argamassa deve deter determinadas características tais como: aderência às paredes e tectos e resistência à tracção apenas nas paredes (Faria *et al.* 2008; Freitas, n.d.; Penas, 2008).

O reboco é constituído por diferentes camadas (três a quatro). Este número depende do: tipo de suporte, das condições de exposição às intempéries (mais ou menos severas) e do tipo de acabamento e grau de protecção. Em geral, é composto por: encasque, salpico/crepido, camada de base e camada de acabamento. Na elaboração das diferentes camadas a quantidade de ligante varia (diminui) no sentido do suporte para o exterior do reboco. A diminuição neste sentido tem como objectivo a diminuição da fendilhação/fissuração (Pinho, 2008).

Na tabela 2.3 referem-se as funções das diferentes camadas de reboco e tecem-se algumas observações sobre estas (Pinho, 2008).

Tabela 2.3 – Funções e observações de cada uma das camadas (Pinho, 2008)

Camada	Função	Observações
<b>Encasque</b> <sup>(1)</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Proceder à reparação de cavidades ou irregularidades</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para diminuir a retracção e a fissuração.</li> <li>• O preenchimento é feito com argamassas e fragmentos de material cerâmico e pedra.</li> </ul>
<b>Crespido</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Garantir a aderência ao suporte e à camada seguinte</li> <li>• Limitar ou homogeneizar a tendência do suporte para absorver água da argamassa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Esta camada tem que ser bastante fluida para não interferir nas reacções de hidratação, provocando carência de água.</li> <li>• Esta camada deve ser rugosa</li> </ul>
<b>Camada base</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Assegurar a planeza</li> <li>• Certificar a verticalidade/horizontalidade</li> <li>• Garantir a regularidade superficial dos paramentos</li> <li>• Contribuir para a impermeabilização</li> <li>• Propiciar uma boa aderência à camada seguinte</li> </ul>	- -

Tabela 2.3 – Funções e observações de cada uma das camadas (Pinho, 2008) (continuação)

Camada	Função	Observações
<b>Camada de acabamento</b> <sup>(2)</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aspecto final (cor e textura)<sup>(3)</sup></li> <li>• Favorecer a impermeabilização</li> <li>• Contribuir para a resistência ao choque</li> <li>• Cobrir as fendas da camada anterior</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acabamento liso mais propício para a fendilhação</li> </ul>

<sup>(1)</sup> Camada executada em paredes apenas em obras de reabilitação.

<sup>(2)</sup> A camada de acabamento pode ser substituída pelo estuque, camada possível apenas no interior. Esta é constituída por cal e gesso e aplica-se com duas camadas (1ª de preparação e 2ª de revestimento). A camada que o antecede o estuque tem que ser rugosa para permitir a sua aderência.

<sup>(3)</sup> A textura tem que ter em conta a estética, natureza do suporte, as camadas subjacentes, exposição às intempéries e à poluição atmosférica.

### **Argamassa de regularização**

Esta argamassa aplica-se em pavimentos e tem como funções: ganhar cota (enchimento) e preparar o suporte para o revestimento, criando uma superfície plana (com ou sem pendente). Com vista a não sobrecarregar o suporte devem-se utilizar areias e agregados leves (granulado de poliestireno expandido, argila expandida, granulado negro de cortiça). O revestimento aplicado pode ser: cerâmico, material pétreo, madeira ou material resiliente. Em geral, os requisitos exigidos a este tipo de argamassa são: resistência à compressão, leveza e economia (Alves, 2009; Couto *et al.*, 2007; Pinto *et al.* 2012).

## **2.3. Caracterização e classificação das cinzas volantes**

Nesta secção aborda-se o objecto de estudo, as cinzas volantes, quanto à sua caracterização, classificação e ao seu modo de obtenção.

### **2.3.1. Caracterização**

As cinzas volantes podem ser de natureza siliciosa ou calcária. A primeira é constituída fundamentalmente por dióxido de silício reactivo e por óxido de alumínio, em menor quantidade; porém, também contem óxido de ferro e outros compostos. A segunda é formada por óxido de cálcio reactivo, dióxido de silício reactivo e óxido de alumínio; o restante é óxido de ferro e outros elementos. Estas cinzas volantes (origem siliciosa ou calcária) têm propriedades pozolânicas, porém as calcárias também podem ter propriedades hidráulicas (IPQ, 2001). A cinza volante utilizada no presente trabalho é de natureza siliciosa.

Este aditivo apresenta-se sob a forma de um pó fino, constituído por partículas esféricas, irregulares ou angulares. As suas dimensões variam muito, podendo ter desde valores pequenos (0-20 µm) até valores na ordem dos 50-500 µm (IPQ, 2001; Santos, 2009; Velosa, 2006).

A composição química da cinza volante é variável, pois depende de vários factores: da classe e quantidade de material mineral existente no carvão utilizado e das suas condições (eficácia) de combustão (quantidade de carvão não queimado ou teor de inqueimados). O carvão utilizado pode ser betuminoso (betume) ou sub-betuminoso e de lignite (elevado teor de carbono). No entanto, os

constituintes químicos que compõem essencialmente as cinzas volantes são a sílica (dióxido de silício), alumina (óxido de alumina) e óxido de ferro (Faria, 2004; Santos, 2009; Velosa, 2006).

De um modo geral, considera-se que a cinza volante é composta por partículas esféricas vítreas (resultantes da argila do carvão), partículas esféricas negras de magnetite (resultantes do ferro das pirites do carvão) e nalguns casos, por partículas de carvão (Faria, 2004; IPQ, 2005).

As cinzas volantes são objecto de tratamento, antes de serem aplicadas, segundo: a sua classificação, selecção, peneiração, secagem, mistura, moagem ou redução pelo carbono, de modo a otimizar a sua finura, reduzir a quantidade de água necessária à amassadura ou melhorar outras propriedades (IPQ, 2005).

### **2.3.2. Classificação**

A qualidade das cinzas é controlada segundo requisitos químicos e físicos, como mencionado anteriormente (ponto 2.2.1). Este controlo é da responsabilidade do produtor das cinzas volantes (IPQ; 2008). O requisito químico tem interesse para a presente dissertação é a perda ao fogo. Este requisito tem como objectivo limitar a quantidade de carbono não queimado (carbono livre ou teor de inqueimados) nas cinzas volantes. Este teor de inqueimados influencia a composição e a qualidade da cinza volante, sendo que em percentagens elevadas pode afectar negativamente o desempenho das cinzas (Velosa, 2006; Santos, 2009).

Segundo a norma NP EN 196-2 (IPQ, 1996), a perda ao fogo (massa) é determinada por calcinação ao ar a 975°C. O procedimento consiste em: colocar  $(1 \pm 0,05)$ g de cinza volante ( $m_i$ ) num cadinho previamente calcinado e tarado; posteriormente, condiciona-se o cadinho tapado na mufla (estufa) a uma temperatura estabilizada de 975°C, durante 5min; no fim, retira-se a tampa e mantém-se por mais 10min na mufla; arrefece-se num exsiccador até à temperatura ambiente; pesa-se e verifica-se se a massa é constante (calcinações sucessivas durante 15min; atinge-se massa constante quando a diferença entre duas pesagens sucessivas for inferior a 0,0005g). O cálculo da perda ao fogo bruta é determinado segundo a fórmula 2.4:

$$\text{Perda ao fogo bruta} = \left( \frac{m_i - m_{i+1}}{m_i} \right) \times 100 \quad (2.4)$$

Sendo  $m_i$  a massa inicial [gramas];  $m_{i+1}$  a massa calcinada [gramas] (IPQ, 1996).

A proporção dos limites de carbono não queimado deve satisfazer as categorias mencionadas nas normas de que depende da aplicação das cinzas volantes: NP 450-1: 2012 (“cinzas volantes para betão”), NP EN 197-1 2001 (“cimento correntes”) e NP 4220 2010 (“pozolanas para betão, argamassa e caldas”). Na tabela 2.4 apresentam-se os valores característicos da percentagem em massa da perda ao fogo, cujos valores não podem ser excedidos (IPQ, 2001; IPQ, 2010; IPQ, 2012).

As duas normas NP 450-1: 2012 (“cinzas volantes para betão”) e NP EN 197-1 2001 (“cimento correntes”) são vocacionadas para ligantes hidráulicos. Assim sendo, como na presente campanha experimental se utiliza um ligante aéreo (cal aérea), considera-se apenas a norma NP 4220 2010 para análise da conformidade. Esta indica que o limite máximo de perda ao fogo é 9% em massa.

Tabela 2.4 – Limites da perda ao fogo para betão, cimentos correntes e pozolanas

Material	Categoria	Perda ao fogo [% em massa]	Normas
<b>Betão</b>	A	5	NP EN 450-1: 2012
	B	7	
	C	9	
<b>Cimentos correntes</b>	-	5 a 7	NP EN 197-1 2001
<b>Pozolanas</b>	-	9	NP 4220 2010

A central termoelétrica do Pego cedeu cinzas volantes conformes e não conformes com perda ao fogo de 4,37% e de 11,03%, respectivamente.

Para a central, a conformidade das cinzas volantes é limitada a 7% perda ao fogo (certificação até este valor). Na tabela 2.5 verifica-se que a classificação de conforme e não conforme concedida pela central do Pego respeita os valores característicos referidos na norma (IPQ, 2012).

Tabela 2.5 – Cinzas volantes utilizadas na presente dissertação

Perda ao fogo	Central termoelétrica do Pego ≤ 7 %	NP 4220 2010 - Pozolanas ≤ 9 %
Cinzas volantes conformes <b>4,37%</b>	•	•
Cinzas volantes não conformes <b>11,03%</b>	×	×

### 2.3.3. Produção

As cinzas volantes são um subproduto das centrais termoelétricas que utilizam o carvão como combustível. Em Portugal, existem duas centrais deste tipo: Pego e Sines (REN, 2012).

#### *Breve descrição do funcionamento da Central do Pego*

Esta central termoelétrica localiza-se nas freguesias do Pego e União das freguesias de Alvega e Concavada, concelho de Abrantes (distrito de Santarém), a 150Km NE de Lisboa, sendo margeada pelo rio Tejo, no seu lado esquerdo. A central termoelétrica pertence à empresa TEJO ENERGIA- Produção e Distribuição de Energia Elétrica, S.A., que detem a licença de exploração e o contrato de venda de energia à rede Elétrica Nacional (REN). A exploração da Central está a cargo da empresa PEGOP- Energia Elétrica, S.A., responsável pela intervenção e conservação (Mesquita, 2005; Pinho, 2013). Na figura 2.2 apresentam-se duas vistas da central termoelétrica do Pego.

A central do Pego é uma instalação industrial “convencional”, onde se gera energia eléctrica, que resulta da queima do combustível sólido, o carvão. Este é uma fonte de energia primária não renovável, logo depende das reservas existentes na Natureza (Mesquita, 2005).

A central do Pego é constituída por dois grupos produtores com uma potência unitária de 314MW, perfazendo no total uma potência de 628MW. Cada grupo produtor é composto por um gerador de vapor, um grupo de turbina- alternador, um transformador principal e dois transformadores auxiliares.



a – vista a partir da entrada principal, (Pinho, 2013); b – vista a partir do parque de carvão

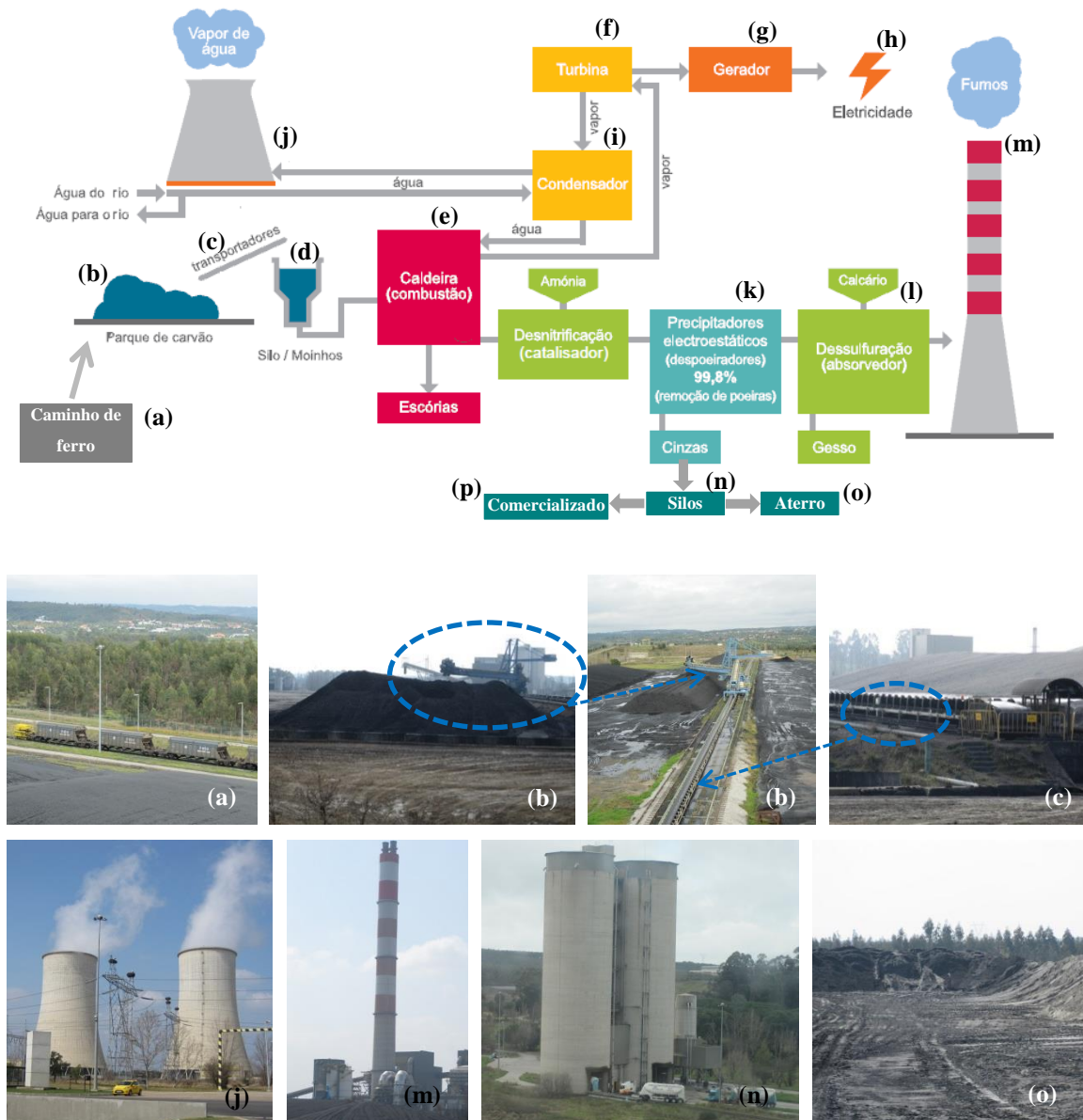
Figura 2.2 – Central Termoelectrica do Pego

O esquema geral e algumas zonas do funcionamento desta central termoelectrica apresentam-se na figura 2.3 (Tejoenergia, 2011).

O carvão utilizado é importado da África do Sul e da Colômbia. O transporte é feito através de navios até ao Porto de Sines, donde é conduzido por caminho-de-ferro [figura 2.3 (a)] até à Central do Pego. Aqui, é descarregado automaticamente, pela parte inferior dos vagões, e encaminhado por meio de telas transportadoras (cobertas) para os silos, situados no interior da Instalação, ou para o Parque de Carvão [figura 2.3 (b)]. Quando o carvão é depositado no Parque, compacta-se e, sempre que necessário, borrifa-se com água para impedir a emissão de poeiras.



Daqui, o carvão é transportado para os silos, que se localizam ao lado dos geradores de vapor, da mesma maneira como foi dos vagões para o Parque (telas transportadoras cobertas). A partir dos silos [figura 2.3 (d)], o carvão é conduzido nos tapetes alimentadores para os moinhos [figura 2.3 (d)], onde é seco e reduzido a pó fino com o intuito de garantir uma combustão completa na câmara ou caldeira de combustão [figura 2.3 (e)]. O ar quente circulante na parte superior de cada caldeira é aspirado por ventiladores e enviado para os moinhos, onde o carvão é seco e encaminhado em suspensão para os queimadores. O combustível em pó inflama-se e é queimado, a uma temperatura de 1250 a 1500 °C (depende da qualidade do carvão) na câmara da caldeira, circundada por painéis tubulares onde percorre a água. Neste processo de combustão ocorrem duas situações: uma fracção de combustível arde (matéria volátil), e uma outra fracção não combustível, que são impurezas (argilas, quartzos, xistos e os feldspatos). As impurezas fundem-se e ficam em suspensão no gás da queima. O vapor de água proveniente do aquecimento dos tubos (caldeira) dirige-se para a turbina [figura 2.3 (f)], através de tubagens de interligação. O vapor de água provoca o movimento das pás da turbina e promove a energia mecânica que é transmitida a um gerador [figura 2.3 (g)], transformando-a em energia eléctrica [figura 2.3 (h)]; inicia-se a distribuição para a rede eléctrica. Este vapor de água passa para o estado líquido no condensador [figura 2.3 (i)]. A água em fase líquida é reutilizada no novo ciclo de produção de vapor. O esfriamento do condensador é feito pela água proveniente das bombas de circulação da bacia das torres de refrigeração [figura 2.3 (j)]. No fim do arrefecimento, é reencaminhada para as torres de refrigeração. A fim de reduzir a quantidade de água consumida, o processo descrito, entre as torres de refrigeração e o condensador [figura 2.3 (i)]; é realizado em circuito fechado. Uma percentagem de água utilizada é proveniente do rio Tejo, sendo restituída a este quando passa pelas torres de refrigeração; todavia nem toda a água é devolvida. A restante é lançada para atmosfera em forma de vapor. Os gases quentes saídos da câmara de combustão atravessam uma fase mais fria e solidificam (precipitadores electrostáticos) originando cinzas volantes. Os precipitadores electrostáticos [figura 2.3 (k)] (despoeiradores), onde ficam retidas grande parte das cinzas volantes, a fim de evitar a sua emissão para a atmosfera. Aquando da passagem pelos precipitadores electrostáticos, os gases atravessam o absorvedor [figura 2.3 (l)]. Por fim, os gases são expulsos na conduta principal de fumos e saem pela chaminé [figura 2.3 (m)]. As cinzas volantes são recolhidas em tremonhas localizadas no trajecto dos gases quentes, essencialmente nas dos precipitadores electrostáticos e encaminhadas por via pneumática para silos [figura 2.3 (n)]. Antes de serem depositadas nos silos, as cinzas volantes são submetidas a ensaios de perda ao fogo, sendo conduzidas para diferentes silos consoante a existência ou não de conformidade. As cinzas volantes são armazenadas nos silos até serem conduzidas para o seu destino final, que pode ser a comercialização [figura 2.3 (p)] ou a deposição em aterro [figura 2.3 (o)] (Faria, 2004;Henriques, 2012; Mesquita, 2005; Tejoenergia, 2011).



a – caminho de ferro; b – parque do carvão; c – tapetes alimentadores (transportadores); j – torres de refrigeração; m – chaminé; n – silos onde são depositadas as cinzas volantes; o – parque das cinzas volantes

Figura 2.3 – Esquema geral da central termoelectrica e zonas de referencia (Tejoenergia, 2011)

A central do Pego tem um laboratório químico que obteve, pelo Instituto Português de Acreditação, o certificado de laboratório de ensaios acreditado para análises do carvão (desde 1998) e das cinzas (desde 2002) (Tejoenergia, n.d.).

A produção de cinzas volantes por ano depende do funcionamento da central. Do total das cinzas volantes produzidas, mais de 95% são vendidas para a indústria cimenteira e de betão. A percentagem de cinza volante que não é vendida é depositada no parque das cinzas, como acontece com as escórias (Henriques, 2012).

## Capítulo 3

### TRABALHOS EXPERIMENTAIS DE REFERÊNCIA

#### 3.1. Considerações iniciais

Neste capítulo mencionam-se trabalhos de investigação sobre o comportamento das argamassas de cal aérea com e sem cinzas volantes. A pesquisa bibliográfica incidiu em parâmetros que se enquadram nesta dissertação: composições e procedimentos experimentais semelhantes e, sempre que possível, o mesmo traço volumétrico, permitindo assim servir de referência aos valores obtidos na presente campanha experimental. No final, apresenta-se um resumo dos resultados obtidos por cada autor sob a forma de tabela.

#### 3.2. Trabalhos de investigação para comparação

Como referido no Capítulo 1, a presente dissertação visa estudar a influência das cinzas volantes não conformes em argamassas de cal aérea. Nesse sentido, apresentam-se trabalhos que servem de “comparação” ao presente estudo, sendo feita a sua discussão no Capítulo 5. Apesar da extensa bibliografia sobre a utilização de cinzas volantes em betões e argamassas de cimento, o mesmo não acontece com a sua utilização em argamassas de cal aérea e com o uso de cinzas volantes não conformes em argamassas. Assim sendo, os trabalhos experimentais referidos são essencialmente de dois tipos: argamassas de cal aérea ao traço volumétrico 1:3 e argamassas de cal aérea com cinzas volantes conformes com traços volumétricos diferentes do estudado neste trabalho. O primeiro tipo de trabalhos permite comparar directamente com a argamassa de referência (A0) e o segundo com as argamassas de cinzas volantes conformes (A1 e A2).

Na tabela 3.1 expõem-se os trabalhos obtidos no levantamento bibliográfico efectuado. De seguida, faz-se uma introdução genérica de cada trabalho e apresentam-se os valores obtidos nas respectivas campanhas experimentais

Tabela 3.1 - Trabalhos de experimentais de “ referência”

<b>Data</b>	<b>Título do trabalho</b>	<b>Autor (es)</b>	<b>Instituições de investigação</b>
<b>2004</b>	Argamassas de revestimento para alvenarias antigas: contribuição para o estudo da influência dos ligantes	P. Faria	FCT - UNL
<b>2006</b>	Argamassas de cal com pozolanas para revestimento de paredes antigas	A. Velosa	SAEC - UA
<b>2006</b>	Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas	V. Rato	FCT - UNL
<b>2007</b>	Análise comparativa de argamassas de cal aérea, medianamente hidráulicas e de ligantes mistos para rebocos de edifícios antigos.	C. Guerreiro, F. Henriques, A. Pinto	EPUL, FCT - UNL IST - UNL
<b>2007</b>	Paredes de alvenaria “ordinária” – Estudo experimental com modelos simples e reforçados	F. Pinho	FCT - UNL
<b>2008</b>	Comparative evaluation of lime mortars for architectural conservation	P. Faria, F. Henriques, V. Rato	FCT - UNL
<b>2008</b>	Estudo da evolução do desempenho no tempo de argamassas de cal aérea	C. Agostinho	IST - UL
<b>2009</b>	Argamassas de revestimento para paredes de edifícios antigos com incorporação de adições pozolânicas	Inês Santos	IST - UL
<b>2009</b>	Effect of maturation time on the fresh and hardened properties of an air lime mortar	H. Paiva <sup>(1)</sup> A. Velosa <sup>(1)</sup> R. Veiga <sup>(2)</sup> V. Ferreira <sup>(3)</sup>	<sup>(1)</sup> DEC-UA <sup>(2)</sup> LNEC <sup>(3)</sup> DEC-UA/ CICECO
<b>2010</b>	Durabilidade de argamassas de cal aérea e bastardas face à acção de sais solúveis	M. Barreto	FCT - UNL
<b>2012</b>	Análise experimental de argamassas de terra com cais e fibras naturais	I. Gomes T. Gonçalves P. Faria	ISEL LNEC FCT-UNL

P. Faria (Faria, 2004) realizou um estudo para avaliar a influência de ligantes no comportamento das argamassas, nomeadamente a cal aérea e os componentes pozolânicos que reajam ou não com ela. Nesse sentido, efectuou ensaios experimentais em provetes prismáticos de 4cm×4cm×16cm. Para efeitos comparativos à presente dissertação, considerou-se os valores de dois tipos de argamassas: argamassa de cal aérea (marca Lusical) e argamassas de cal aérea e cinzas volantes. Os valores obtidos na caracterização física de cada material (cal aérea, areia de rio, cinzas volantes) são indicados na tabela 3.2. Para a produção das argamassas foram utilizadas as proporções volumétricas de 1:3 para a argamassas de cal aérea e de 1:0,5:3, 1:1:4 e 1:1,5:5 para as argamassas de cal aérea e cinzas volantes. A cura dos provetes foi feita num ambiente controlado à temperatura de 23°C e à humidade relativa de 50%, ou seja, considerou-se apenas cura seca. Neste trabalho, os provetes foram submetidos a ensaios de caracterização física e mecânica aos 60 dias de idade, cujos valores obtidos encontram-se nas tabelas 3.3 a 3.6.

Tabela 3.2 – Caracterização física dos materiais utilizados no estudo de P. Faria (Faria, 2004)

Materiais	Características físicas			
	Módulo de finura [-]	Máxima dimensão do agregado [mm]	Mínima dimensão do agregado [mm]	Baridade [kg/m <sup>3</sup> ]
Areia de rio	2,7	2,38	0,297	1280
Cal aérea	-	-	-	570
Cinzas volantes	-	-	-	940

Tabela 3.3 – Caracterização da argamassa de cal aérea ao traço volumétrico 1:3 utilizada no estudo de P. Faria (Faria, 2004)

	Características	Resultados
Físicas	Coefficiente de absorção de água por capilaridade [kg/m <sup>2</sup> .s <sup>1/2</sup> ] <sup>(1)</sup>	0,37
	Valor assintótico [kg/m <sup>2</sup> ] <sup>(1)</sup>	18,1
	Massa volúmica aparente [kg/m <sup>3</sup> ]	1720
	Porosidade aberta [%]	34
Mecânicas	Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]	2300
	Resistência à tracção por flexão [MPa]	0,33
	Resistência à compressão [MPa]	0,65

<sup>(1)</sup> Ensaio realizado com “meios provetes”.

Tabela 3.4 – Caracterização da argamassa de cal aérea e cinzas volantes ao traço volumétrico 1:0,5:3 utilizada no estudo de P. Faria (Faria, 2004)

	Características	Resultados
Físicas	Coefficiente de absorção de água por capilaridade [kg/m <sup>2</sup> .s <sup>1/2</sup> ]	0,24
	Valor assintótico [kg/m <sup>2</sup> ]	17,4
	Massa volúmica aparente [kg/m <sup>3</sup> ]	1810
	Porosidade aberta [%]	30
Mecânicas	Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]	3090
	Resistência à tracção por flexão [MPa]	0,29
	Resistência à compressão [MPa]	0,76

Tabela 3.5 – Caracterização da argamassa de cal aérea e cinzas volantes ao traço volumétrico 1:1:4 utilizada no estudo de P. Faria (Faria, 2004)

	Características	Resultados
Físicas	Coefficiente de absorção de água por capilaridade [kg/m <sup>2</sup> .s <sup>1/2</sup> ]	0,21
	Valor assintótico [kg/m <sup>2</sup> ]	16,7
	Massa volúmica aparente [kg/m <sup>3</sup> ]	1830
	Porosidade aberta [%]	29
Mecânicas	Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]	3720
	Resistência à tracção por flexão [MPa]	0,42
	Resistência à compressão [MPa]	0,88

Tabela 3.6 – Caracterização da argamassa de cal aérea e cinzas volantes ao traço volumétrico 1:1,5:5 utilizada no estudo de P. Faria (Faria, 2004)

	<b>Características</b>	<b>Resultados</b>
<b>Físicas</b>	Coefficiente de absorção de água por capilaridade [kg/m <sup>2</sup> .s <sup>1/2</sup> ]	0,23
	Valor assintótico [kg/m <sup>2</sup> ]	16,8
	Massa volúmica aparente [kg/m <sup>3</sup> ]	1830
	Porosidade aberta [%]	29
<b>Mecânicas</b>	Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]	3060
	Resistência à tracção por flexão [MPa]	0,29
	Resistência à compressão [MPa]	0,60

A. Velosa (Velosa, 2006) efectuou um estudo sobre argamassas de cal aérea e pozolanas (naturais e artificiais) para aplicar na conservação de edifícios antigos. Para tal, foram preparadas diferentes tipos de argamassas que foram ensaiadas em idades distintas. No entanto, para a presente dissertação serviram apenas de referência os resultados dos provetes de dois tipos de argamassas: a argamassa de cal aérea e de areia de rio a um traço volumétrico de 1:3 e a argamassa cal aérea, cinzas volantes e areia de rio a um traço volumétrico de 1:1:4. Com estas argamassas elaborou provetes prismáticos de 4cm×4cm×16cm que foram ensaiados aos 90 dias de idade de modo a caracterizá-los física e mecanicamente. Os resultados obtidos da campanha experimental são apresentados nas tabelas 3.7 (cal aérea) e 3.8 (cal aérea e cinzas volantes).

Tabela 3.7 – Caracterização da argamassa de cal aérea ao traço volumétrico 1:3 utilizada no estudo de A. Velosa (Velosa, 2006)

	<b>Características</b>	<b>Resultados</b>
<b>Físicas</b>	Coefficiente de capilaridade [kg/m <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> ] <sup>(1)</sup>	17,21
<b>Mecânicas</b>	Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]	2327
	Resistência à tracção por flexão [MPa]	0,26
	Resistência à compressão [MPa]	0,84

<sup>(1)</sup> Ensaio realizado em provetes inteiros.

Tabela 3.8 – Caracterização da argamassa de cal aérea e cinzas volantes ao traço volumétrico 1:1:4 utilizada no estudo de A. Velosa (Velosa, 2006)

	<b>Características</b>	<b>Resultados</b>
<b>Físicas</b>	Coefficiente de absorção de água por capilaridade [kg/m <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> ] <sup>(1)</sup>	17,43
<b>Mecânicas</b>	Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]	4352
	Resistência à tracção por flexão [MPa]	0,52
	Resistência à compressão [MPa]	1,02

<sup>(1)</sup> Ensaio realizado em provetes inteiros.

V. Rato (Rato, 2006) teve como objectivo analisar o modo como se relacionam o tipo de ligante e a granulometria das areias, as propriedades da microestrutura morfológica e o comportamento de

argamassas. Nesse sentido, foram elaboradas cinquenta composições de argamassa constituídas por quatro tipos de ligante e por dezasseis areias com granulometria diferente. Este trabalho foi composto por duas fases: a primeira, designada por avaliação preliminar, que consistiu na elaboração de vinte e quatro composições de argamassas, que correspondem a seis areias com diferentes granulometrias e quatro ligantes e a segunda fase, classificada por desenvolvimento experimental, que incidiu na preparação de vinte seis composições de argamassas com areias monogranulares e misturas e com dois ligantes (cal aérea e cimento branco). Para efeitos comparativos com a presente dissertação, consideraram-se as argamassas que foram elaboradas com materiais idênticos. Assim sendo, na fase preliminar seleccionou-se a areia com dimensão máxima de 1,18mm e dimensão mínima de 0,075mm e na fase do desenvolvimento experimental considerou-se a areia com baridade de 1,61g/m<sup>3</sup>. A quantidade de água de amassadura esteve relacionada com o valor de consistência por espalhamento atingir: 65% na fase preliminar e no intervalo de 70-75% na outra fase. As argamassas foram produzidas a um traço volumétrico de 1:3 e moldadas em provetes prismáticos de 4cm×4cm×16cm. Na tabela 3.9 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de caracterização física e mecânica, os quais foram realizados em idades diferentes: 60 dias- fase de avaliação preliminar e 68 dias - fase de desenvolvimento experimental. Na figura 3.1 pode-se observar a distribuição de poros obtidos no ensaio de porosimetria de mercúrio realizado na fase de desenvolvimento experimental (indicado com uma seta).

Tabela 3.9 – Caracterização da argamassa de cal aérea ao traço volumétrico 1:3 utilizada no estudo de R. Vasco (Rato, 2006)

Características		Resultados	
		60 dias	68 dias
<b>Físicas</b>	Coeficiente de absorção de água por capilaridade [kg/m <sup>2</sup> .s <sup>1/2</sup> ] <sup>(1)</sup>	0,228	0,211
	Valor assíptótico [ kg/m <sup>2</sup> ] <sup>(1)</sup>	18,039	31,311
	Massa volúmica aparente [kg/m <sup>3</sup> ]	1691	1843
	Porosidade aberta [%]	35	300
<b>Mecânicas</b>	Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]	3925	3215
	Resistência à tracção por flexão [MPa]	0,55	0,39
	Resistência à compressão [MPa]	1,47	0,87

<sup>(1)</sup> Ensaio realizado em provetes inteiros.

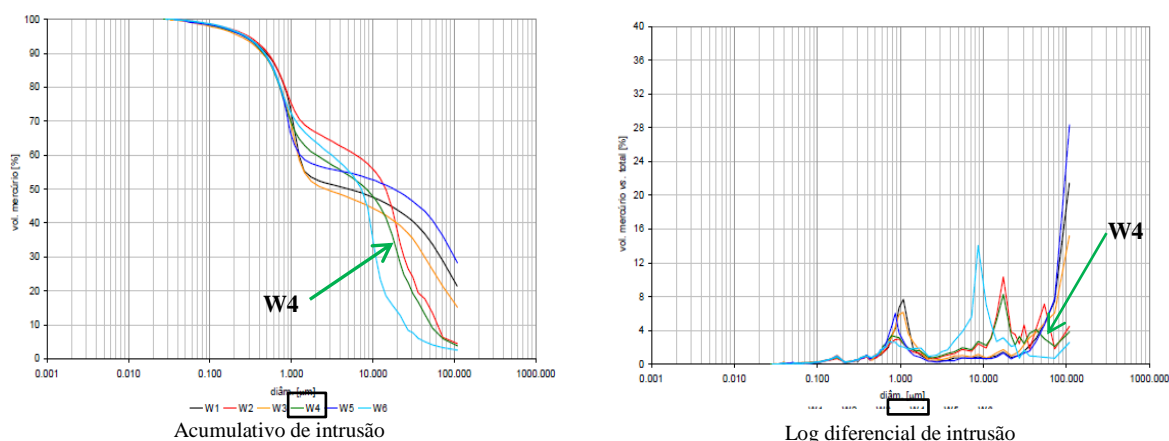


Figura 3.1 – Distribuição dos poros das argamassas utilizadas no estudo de V. Rato (Rato, 2006)

C. Guerreiro *et al.*, 2007 (Guerreiro *et al.*, 2007), realizaram um estudo para proceder à avaliação e análise comparativa de formulações de argamassa de cal aérea, cal medianamente hidráulica e de ligantes mistos. Esta análise teve como base a caracterização das argamassas de modo a avaliar o seu potencial desempenho para rebocos de edifícios antigos. Na campanha experimental foram executadas cinco amassaduras com diferentes ligantes e também com traços volumétricos distintos. Para cada argamassa realizaram-se seis provetes prismáticos de 4cm×4cm×16cm que foram ensaiados em diferentes idades (60 dias e 120 dias). Antes da moldagem, foi realizado o ensaio de consistência por espalhamento, cujos valores são: 65% - provetes ensaiados aos 60 dias e 69% - provetes ensaiados aos 120 dias. De seguida, os provetes foram colocados até a data de ensaio, numa sala condicionada a uma temperatura de  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$  e a uma humidade relativa de  $60\pm 5\%$ . Na tabela 3.10 são apresentados apenas os resultados obtidos da caracterização física e mecânica da argamassa de cal aérea e de areia de rio (proporção volumétrica de 1:3), pois são os únicos valores relevantes para efeitos comparativos à presente dissertação.

Tabela 3.10 – Caracterização da argamassa de cal aérea ao traço volumétrica 1:3 utilizada no estudo de C. Guerreiro *et al.* (Guerreiro *et al.*, 2007)

Características		Resultados	
		60 dias	120 dias
Físicas	Coefficiente de absorção de água por capilaridade $[\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}]^{(1)}$	0,287	0,255
	Valor assintótico $[\text{kg}/\text{m}^2]^{(1)}$	17,98	17,37
	Massa volúmica real $[\text{kg}/\text{m}^3]$	2604	2604
	Massa volúmica aparente $[\text{kg}/\text{m}^3]$	1724	1761
	Porosidade aberta [%]	33,8	32,4
Mecânicas	Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]	2350	2230
	Resistência à tracção por flexão [MPa]	0,28	0,24
	Resistência à compressão [MPa]	0,69	0,69

<sup>(1)</sup> Ensaio realizado em “meios provetes”.



F. Pinho (Pinho, 2007) realizou um estudo experimental sobre paredes de alvenaria antigas, construindo uns modelos, designados por muretes. Os materiais (pedra, areias, cal e argamassas) utilizados na construção dos muretes foram submetidos a diferentes ensaios de caracterização, física, mecânica e química. Para isso, foram produzidos vários tipos de provetes (diferentes dimensões) e ensaiados a diferentes idades. Para efeitos comparativos apenas considerou-se os provetes prismáticos de 4cm×4cm×16cm, ensaiados aos 90 dias. O traço volumétrico utilizado nas argamassas foi 1:3 que corresponde à cal aérea (marca Lusical) e às areias, sendo estas de areeiro e de rio utilizadas em parte iguais. Os resultados da caracterização física da areia de rio apresentam-se na tabela 3.11. Em relação, aos resultados de caracterização física e mecânica das argamassas podem ser consultados na tabela 3.12.

Tabela 3.11 – Caracterização física da areia de rio utilizada no estudo de F. Pinho (Pinho, 2007)

Materiais	Características físicas			
	Módulo de finura [-]	Máxima dimensão do agregado [mm]	Mínima dimensão do agregado [mm]	Baridade [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>Areia de rio</b>	2,7	2,38	0,149	1584,4

Tabela 3.12 – Caracterização da argamassa de cal aérea ao traço volumétrico 1:3 utilizada no estudo de F. Pinho (Pinho, 2007)

Características		Resultados
<b>Físicas</b>	Coefficiente de absorção de água por capilaridade [kg/m <sup>2</sup> .s <sup>1/2</sup> ] <sup>(1)</sup>	17,4
	Massa volúmica real [kg/m <sup>3</sup> ]	2590,1
	Massa volúmica aparente [kg/m <sup>3</sup> ]	1742,9
	Porosidade aberta [%]	32,7
	Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]	2310
<b>Mecânicas</b>	Resistência compressão [MPa]	0,65
	Resistência flexão [MPa]	0,30

<sup>(1)</sup> Ensaio realizado em provetes inteiros.

Faria *et al.* (Faria *et al.*, 2008) realizaram um trabalho para avaliar se as argamassas concebidas com massa de cal aérea com períodos de extinção longos têm um melhor comportamento do que as argamassas actuais constituídas por cal aérea hidratada em seco. Para isso, foi realizada uma campanha experimental, onde foram preparadas argamassas com cal hidratada e duas pastas de cal a um traço volumétrico de 1:2. As argamassas com cal aérea e areia siliciosa foram moldadas em provetes prismáticos de 4cm×4cm×16cm. Os provetes foram mantidos numa sala condicionada a uma temperatura de 23°C e a uma humidade relativa de 50±5% até à data de ensaio. As amostras foram secas até atingirem massa constante a uma temperatura de 60°C. Posteriormente, foram ensaiadas a diferentes idades (60, 90 e 180 dias e 4 anos) para permitir analisar a evolução das características ao longo do tempo. Para a presente dissertação, serviram de referência os resultados obtidos pelo ensaio de porosimetria de mercúrio (realizado aos 4 anos de

idade), que correspondem à distribuição de poros de cada argamassa, como se pode observar na figura 3.2. Todavia, a comparação dos resultados apenas pode ser qualitativa, pois têm traços volumétricos e idades de ensaio diferentes (indicado com uma seta).

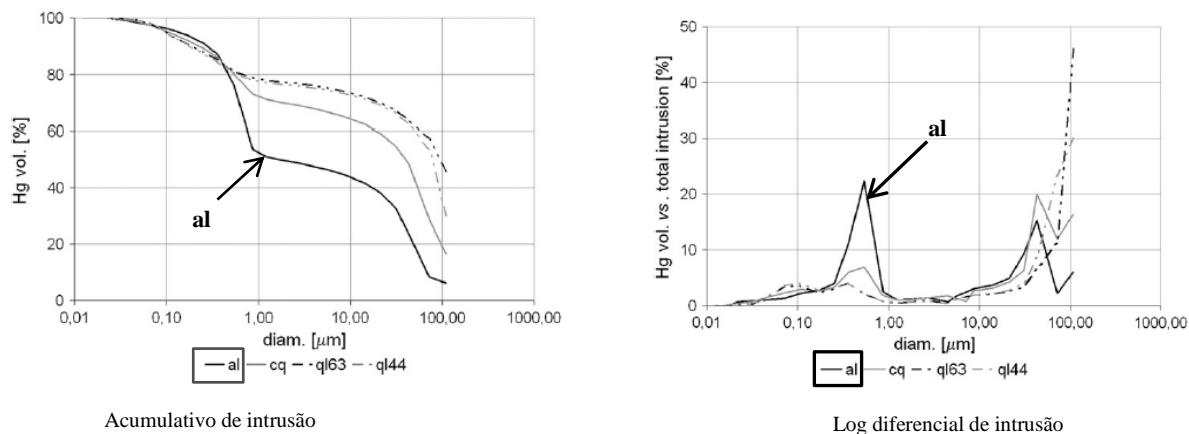


Figura 3.2 – Distribuição dos poros das argamassas utilizadas no estudo de Faria *et al.* (Faria et al., 2008)

C. Agostinho (Agostinho, 2008) realizou um estudo sobre a evolução do desempenho de duas formulações de argamassas de cal aérea em pó e em pasta de uso corrente a um traço volumétrico de 1:3. Este estudo teve como intenção contribuir para o conhecimento e para a prática de aplicação de argamassas de cal aérea em rebocos de substituição de edifícios antigos. Nesse sentido, as argamassas produzidas foram moldadas em provetes prismáticos (4cm×4cm×16cm) e em provetes que simulavam argamassas como camadas de reboco aplicadas em tijolos. Posteriormente, foram sujeitos a ensaios de caracterização física e mecânica em diferentes idades. Para o presente trabalho, apenas se considerou os resultados obtidos da argamassa de cal aérea (em pó) e areia. Esta é composta por dois tipos: areia de rio e de areeiro em proporções iguais (traço volumétrico 1:1,5:1,5). Na tabela 3.13 apresentam-se os valores referentes à caracterização física da cal aérea e da areia de rio. A argamassa no seu estado fresco foi submetida ao ensaio de espalhamento, obtendo-se um valor de 65%. Os resultados dos provetes ensaiados fisicamente e mecanicamente aos 90 dias de idade encontram-se na tabela 3.14.

Tabela 3.13 – Caracterização física dos materiais utilizados no estudo de C. Agostinho (Agostinho, 2008)

Materiais	Características físicas			
	Módulo de finura [-]	Máxima dimensão do agregado [mm]	Mínima dimensão do agregado [mm]	Baridade [kg/m <sup>3</sup> ]
Areia de rio	2,7	2,38	0,149	1401,3
Cal aérea	-	-	-	583,7

Tabela 3.14 – Caracterização da argamassa de cal aérea ao traço volumétrico 1:3 utilizada no estudo de C. Agostinho (Agostinho, 2008)

Características			Resultados
<b>Físicas</b>	Coeficiente de absorção de água por capilaridade [kg/m <sup>2</sup> .s <sup>1/2</sup> ] <sup>(1)</sup>	60 min	0,36
<b>Mecânicas</b>	Resistência à tracção por flexão [MPa]		0,40
	Resistência à compressão [MPa]		1,11

<sup>(1)</sup> Ensaio realizado em provetes inteiros.

I. Santos (Santos, 2009) realizou um trabalho sobre a aplicação de argamassas de cal aérea contendo adições pozolânicas em reboco de substituição de edifícios antigos. Para tal, formulou um conjunto de argamassas de modo a permitir uma análise da influência das adições pozolânicas naturais e artificiais, tendo em conta a sua percentagem e a sua evolução ao longo do tempo, comparando-as com uma argamassa de cal aérea (argamassa de referência). As argamassas produzidas foram moldadas em provetes prismáticos de 4cm×4cm×16cm e aplicadas como camadas de revestimento em tijolos através de técnicas de ensaio “in situ”. Aos provetes prismáticos foram realizados ensaios de caracterização física e mecânica a diferentes idades. Os agregados finos utilizados foram de dois tipos: areia de rio e de areeiro nas mesmas proporções. Para efeitos comparativos com a presente dissertação, os valores a considerar são os referentes à argamassa de cal aérea e à argamassa de cal aérea com cinzas volantes. Contudo, apenas se escolheu os valores das argamassas com cal aérea e cinzas volantes com uma consistência de espalhamento de 65%, cujo valor encontra-se no intervalo considerado nesta dissertação. Na tabela 3.15 podem ser consultados os valores obtidos na caracterização física dos materiais utilizados. Os valores resultantes da caracterização, aos 90 dias de idade, das argamassas de cal aérea e com cinzas volantes a diferentes traços volumétricos: 1:0,5:8 (cal aérea: cinza volante: areia de rio+ areia de areeiro) e 1:1:8 (cal aérea: cinza volante: areia de rio+ areia de areeiro) são apresentados nas tabelas 3.16 e 3.17, respectivamente.

Tabela 3.15 – Caracterização física dos materiais utilizados no estudo de I. Santos (Santos, 2009)

Materiais	Características físicas			
	Módulo de finura [-]	Máxima dimensão do agregado [mm]	Mínima dimensão do agregado [mm]	Baridade [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>Areia de rio</b>	2,6	2,38	1,19	1490
<b>Cal aérea</b>	-	-	-	610
<b>Cinzas volantes</b>	-	-	-	842

Tabela 3.16 – Caracterização da argamassa de cal aérea e de cinzas volantes ao traço volumétrico 1:0,5:8 utilizada no estudo de I. Santos (Santos, 2009)

	<b>Características</b>	<b>Resultados</b>
<b>Físicas</b>	Coefficiente de absorção de água por capilaridade [kg/m <sup>2</sup> .s <sup>1/2</sup> ] <sup>(1)</sup>	0,12
	Valor assimpótico [kg/m <sup>2</sup> ] <sup>(1)</sup>	16,9
<b>Mecânicas</b>	Resistência à tracção por flexão [MPa]	0,31
	Resistência à compressão [MPa]	0,96

<sup>(1)</sup> Ensaio realizado em provetes inteiros.

Tabela 3.17 – Caracterização da argamassa de cal aérea e cinzas volantes ao traço volumétrico 1:1:8 utilizada no estudo de I. Santos (Santos, 2009)

	<b>Características</b>	<b>Resultados</b>
<b>Físicas</b>	Coefficiente de absorção de água por capilaridade [kg/m <sup>2</sup> .s <sup>1/2</sup> ] <sup>(1)</sup>	0,13
	Valor assimpótico [kg/m <sup>2</sup> ] <sup>(1)</sup>	19
<b>Mecânicas</b>	Resistência à tracção por flexão [MPa]	0,15
	Resistência à compressão [MPa]	1,44

<sup>(1)</sup> Ensaio realizado em provetes inteiros.

H. Paiva *et al.* (Paiva *et al.*, 2009) efectuaram um trabalho que tem como objetivo analisar o efeito do processo de maturação nas características da argamassa de cal aérea hidratada em pó. Para isso, prepararam-se argamassas de cal aérea e areia siliciosa a diferentes traços volumétricos sujeitos ou não ao processo de maturação durante sete dias. As argamassas foram moldadas em provetes prismáticos de dimensões de 4cm×4cm×16cm. A cura dos provetes ocorreu numa sala condicionada a uma temperatura de 20°C e a uma humidade relativa de 60%, durante 28 e 90 dias. As argamassas foram caracterizadas em termos de propriedades de transporte de água, comportamento mecânico e porosidade da microestrutura. Para a presente dissertação, os resultados em ter em conta são os referentes à caracterização física e mecânica (ensaiados aos 90 dias de idade) da argamassa de cal aérea a um traço volumétrico de 1:3 (sem maturação), cujos valores são apresentados na tabela 3.18. Porém, também serviu de referência o ensaio de porosimetria de mercúrio realizado aos 28 dias que pode ser consultado na figura 3.3 (indicado com uma seta).

Tabela 3.18 – Caracterização da argamassa de cal aérea ao traço volumétrico 1:3 utilizada no estudo de H. Paiva *et al.* (Paiva *et al.*, 2009)

	<b>Características</b>	<b>Resultados</b>
<b>Físicas</b>	Coefficiente de absorção de água por capilaridade [kg/m <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> ] <sup>(1)</sup>	8,24
	Massa volúmica aparente [kg/dm <sup>3</sup> ]	1,88

Tabela 3.18 – Caracterização da argamassa de cal aérea ao traço volumétrica 1:3 utilizada no estudo de H. Paiva *et al.* (Paiva *et al.*, 2009) (continuação)

	Características	Resultados
<b>Mecânicas</b>	Resistência à tração por flexão [MPa]	0,43
	Resistência à compressão [MPa]	0,88

<sup>(1)</sup> Ensaio realizado em provetes inteiros.

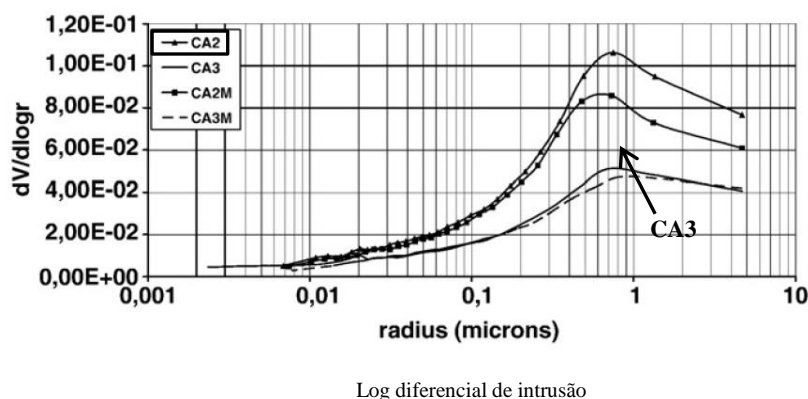


Figura 3.3 – Distribuição dos poros das argamassas utilizadas no estudo de H. Paiva *et al.* (Paiva *et al.*, 2009)

C. Barreto (Barreto, 2010) realizou um trabalho experimental para avaliar a durabilidade de provetes de argamassas bastardas perante acção de sais solúveis e comparou-a com a durabilidade de argamassa de cal aérea. Para além disso, teve em conta a compatibilidade dessas argamassas com as alvenarias “ordinárias”, de modo a serem aplicadas numa das soluções de reforço desenvolvidas no trabalho de investigação efectuada por F. Pinho (Pinho, 2007) no DEC – FCT/UNL. Para efeitos comparativos à presente dissertação considerou-se somente os valores obtidos nos provetes de argamassa de cal aérea (hidratada em pó da marca Lusical) a um traço volumétrico de 1:3. Neste trabalho, foram utilizados dois tipos de agregados finos a areia de areeiro (zona de Rio Maior) e a areia de rio (Lisboa) em proporções iguais. Na tabela 3.19 apresentam-se os resultados obtidos na caracterização física dos materiais: cal aérea e areia de rio. Na elaboração da argamassa foi realizado o ensaio da sua caracterização em pasta (ensaio de espalhamento), cujo valor foi de 69%. De seguida, a argamassa foi moldada mecanicamente em moldes prismáticos de 4cm×4cm×16cm. Estes, após a moldagem e a desmoldagem, foram condicionados numa sala climatizada a uma temperatura de 20°C e a uma humidade relativa de 65%, local onde ocorreu a cura. Ao fim deste tempo, os provetes foram submetidos a ensaios experimentais de caracterização física e mecânica em diferentes idades, como se observa na tabela 3.20. Na figura 3.4 representa-se o desenvolvimento da curva de secagem obtido neste estudo (indicado com uma seta).

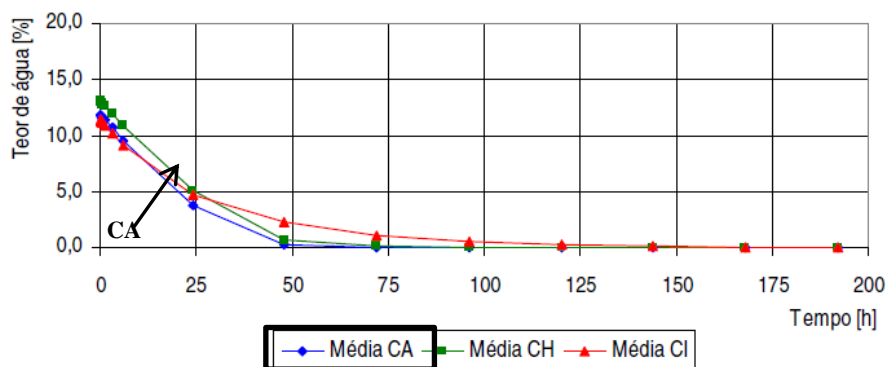
Tabela 3.19 – Caracterização física dos materiais utilizadas no estudo de C. Barreto (Barreto, 2010)

Materiais	Características físicas			
	Módulo de finura [-]	Máxima dimensão do agregado [mm]	Mínima dimensão do agregado [mm]	Baridade [kg/m <sup>3</sup> ]
Areia de rio	2,5	2,38	0,149	1393,2
Cal aérea	-	-	-	290,6

Tabela 3.20 – Caracterização da argamassa de cal aérea ao traço volumétrico 1:3 utilizada no estudo de C. Barreto (Barreto, 2010)

Características		Resultados			
		83 dias	90 dias	108 dias	163 dias
Físicas	Coefficiente de absorção de água por capilaridade [kg/m <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> ]	-	12,14	-	-
	Valor assintótico [kg/m <sup>2</sup> ]	-	15,13	-	-
	Índice de secagem	-	-	0,021	-
	Massa volúmica real [kg/m <sup>3</sup> ]	-	2593,7	-	2590,8
	Massa volúmica aparente [kg/m <sup>3</sup> ]	-	1714,1	-	1667,8
	Porosidade aberta [%]	-	33,9	-	35,6
Mecânicas	Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]	3193	-	-	2454
	Resistência à tracção por flexão [MPa]	0,2	-	-	0,3
	Resistência à compressão [MPa]	0,8	-	-	0,5

(1) Ensaio realizado em “meios provetes”.



CA: cal aérea e areia; CH: cal hidráulica, cal aérea e areia; CI: cimento, cal aérea e areia

Figura 3.4 – Curvas de secagem das argamassas utilizadas no estudo de C. Barreto (Barreto, 2010)

I. Gomes *et al.* (Gomes *et al.*, 2012) realizaram um estudo para desenvolver e caracterizar argamassas de terra eficientes para reparar anomalias em paredes de taipa. Para tal, produziram seis grupos de argamassas a um traço volumétrico de 1:3. Os materiais utilizados foram: terra comercial, cal aérea, cal hidráulica e fibras vegetais. As argamassas foram moldadas em dois tipos de provetes: 6 cúbicos de 5cm×5cm×5cm e 6 prismáticos de 4cm×4cm×16cm. Os primeiros foram submetidos aos ensaios de absorção de água por capilaridade e secagem e os segundos foram sujeitos aos ensaios do módulo de elasticidade dinâmico, resistência à tracção por flexão e

resistência à compressão. Na figura 3.5 apresentam-se duas curvas de secagem (ligante cal aérea e cal hidráulica). A referência a este trabalho teve como intuito analisar o desenvolvimento das curvas de secagem.

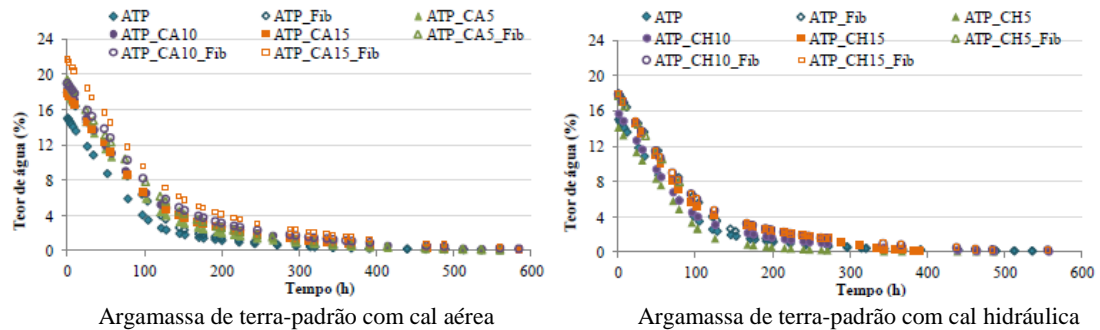


Figura 3.5 – Curvas de secagem das argamassas utilizadas no estudo de I. Gomes *et al.* (Gomes *et al.*, 2012)

### 3.3. Síntese de trabalhos

Na tabela 3.21 apresenta-se o resumo dos valores obtidos na campanha experimental de cada autor, servindo de referência ao presente trabalho.

Tabela 3.21 – Síntese dos resultados obtidos por cada autor

Autor(es)	Material	Características físicas										Características mecânicas		
		MF [-]	D [mm]	d [mm]	Ba [kg/m <sup>3</sup> ]	C <sub>ac</sub> [kg/m <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> ]	VA [kg/m <sup>2</sup> ]	IS [-]	MVR [kg/m <sup>3</sup> ]	MVA [kg/m <sup>3</sup> ]	PA [%]	E <sub>din</sub> [MPa]	R <sub>f</sub> [MPa]	R <sub>c</sub> [MPa]
P. Faria	Areia de rio	2,7	2,38	0,297	1280									
	Cal aérea	x	x	x	570									
	Cinzas volant	x	x	x	940									
	Argamassa (1:3) Idade: 60dias					22,20	18,1	x	x	1720	34	2300	0,33	0,65
	Argamassa (1:0,5:3) Idade: 90dias					14,40	17,4	x	x	1810	30	3090	0,29	0,75
	Argamassa (1:1:4) Idade: 90dias					12,60	16,7	x	x	1830	29	3720	0,42	0,88
	Argamassa (1:1,5:5) Idade: 90dias					13,8	16,8	x	x	1830	29	3060	0,29	0,60
A. Velosa	Argamassa (1:3) Idade: 90dias					17,21	x	x	x	x	x	2327	0,26	0,84
	Argamassa (1:1:4) Idade: 90dias					17,43	x	x	x	x	x	4352	0,52	1,02
V. Rato	Argamassa (1:3) Idade: 60dias					13,68	18,04	x	x	1691	35	3925	0,55	1,47
	Argamassa (1:3) Idade: 60dias					12,66	31,31	x	x	1843	30	3125	0,39	0,87

(1) x - Ensaio não realizado.



(2)  Ensaio não aplicável.

Tabela 3.21 – Síntese dos resultados obtidos por cada autor (continuação)

Autor (es)	Material	Características físicas									Características mecânicas			
		MF [-]	D [mm]	d [mm]	Ba [kg/m <sup>3</sup> ]	C <sub>ac</sub> [kg/m <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> ]	VA [kg/m <sup>2</sup> ]	IS [-]	MVR [kg/m <sup>3</sup> ]	MVA [kg/m <sup>3</sup> ]	PA [%]	E <sub>din</sub> [MPa]	R <sub>f</sub> [MPa]	R <sub>c</sub> [MPa]
C. Guerreiro <i>et al.</i>	Argamassa (1:3) Idade: 60dias					17,2	17,98	×	2604	1724	33,8	2350	0,28	0,69
	Argamassa (1:3) Idade: 120dias					15,3	17,37	×	2604	1761	32,4	2230	0,24	0,69
	Argamassa (1:3) Idade: 130dias					×	×	×	×	×	×	×	×	×
F. Pinho	Areia de rio	2,7	2,38	0,149	1584,4									
	Argamassa (1:3) Idade: 90dias					17,4	×	×	2590,1	1742,9	32,7	2310	0,65	0,30
C. Agostinho	Areia de rio	2,70	2,38	0,149	1401,3									
	Cal aérea	×	×	×	583,7									
	Argamassa (1:3) Idade: 90dias					21,6	×	0,59	×	×	×	×	0,40	1,11
I. Santos	Areia de rio	2,60	2,38	1,19	1490									
	Cal aérea	×	×	×	610									
	Cinzas volantes	×	×	×	842									
	Argamassa (1:1:8) Idade: 90dias					7,8	19	×	×	×	×	×	0,15	1,44
	Argamassa (1:0,5:8) Idade: 90dias					7,2	16,9	×	×	×	×	×	0,31	0,96
H. Paiva <i>et al.</i>	Argamassa (1:3) Idade: 90dias					63,8	1,88	×	×	1880	×	×	0,43	0,88
C. Barreto	Areia de rio	2,5	2,38	0,149	1393,2									
	Cal aérea	×	×	×	290,6									
	Argamassa (1:3) Idade: 83dias					×	×	×	×	×	×	3193	0,2	0,8
	Argamassa (1:3) Idade: 90dias					12,14	15,13	×	2593,7	1714,1	33,9	×	×	×
	Argamassa (1:3) Idade: 108dias					×	×	0,021	×	×	×	×	×	×
	Argamassa (1:3) Idade: 163dias					×	×	×	×	×	×	2454	0,3	0,5

(1) × - Ensaio não realizado.

(2)  Ensaio não aplicável



## Capítulo 4

### CAMPANHA EXPERIMENTAL

#### 4.1. Considerações iniciais

Neste capítulo descreve-se a campanha experimental realizada (procedimentos experimentais e resultados obtidos) que permitiu caracterizar os constituintes e as argamassas em estudo. Inicia-se com a identificação dos materiais e a sua caracterização física (análise granulométrica e baridade). Com estes materiais, prepararam-se cinco tipos de argamassas (numeradas de A0 a A4): uma argamassa de referência (sem cinzas volantes), duas argamassas com cinzas volantes conformes nas proporções de 1/6 e 2/6 em relação ao volume do ligante e mais duas argamassas com cinzas volantes não conformes, nas mesmas percentagens das cinzas volantes conformes (tabela 4.2). Em seguida, moldaram-se as cinco argamassas em provetes (prismáticos e provetes para o ensaio de aderência) para proceder à realização dos ensaios, de modo a caracterizá-las física e mecanicamente. Os ensaios foram realizados no DEC-FCT/UNL.

#### 4.2. Materiais constituintes das argamassas

Os materiais usados na produção das argamassas foram: a areia normalizada (agregado fino), cal aérea (ligante), aditivos (cinzas volantes conformes e não conformes) e água.

##### 4.2.1. Areia normalizada

Na elaboração das argamassas utilizou-se como agregado fino a areia normalizada (cedida pela Empresa SECIL), figura 4.1.



Figura 4.1 – Areia normalizada

#### **4.2.2. Cal aérea**

Na execução das argamassas usou-se como ligante a cal aérea hidratada em pó da marca Lusical H100, figura 4.2.

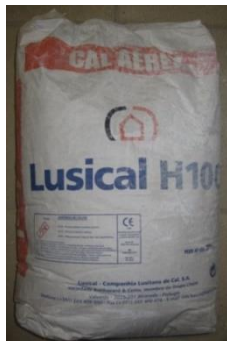
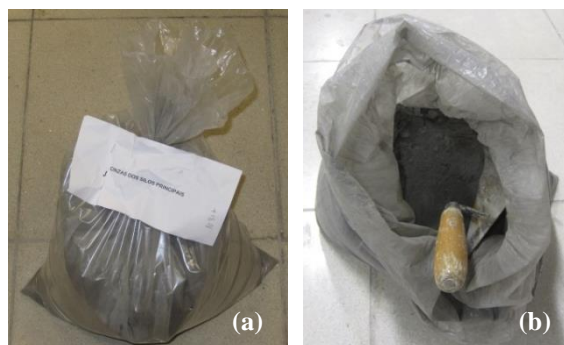


Figura 4.2 – Cal aérea

#### **4.2.3. Cinzas volantes conformes e não conformes**

Para a produção das argamassas utilizaram-se como aditivos as cinzas volantes conformes e não conformes, figura 4.3, que foram cedidas pela Central Termoelétrica do Pego. As proporções das cinzas variaram entre 1/6 e 2/6 em relação ao volume do ligante (tabela 4.2).



a – cinzas volantes conformes; b – cinzas volantes não conformes

Figura 4.3 – Cinzas volantes

#### **4.2.4. Água**

Para a preparação das diferentes argamassas utilizou-se água da rede de abastecimento pública da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

### **4.3. Ensaios de caracterização física dos materiais das argamassas**

Os constituintes (areia normalizada, cal área, cinzas volantes conformes e não conformes) referidos anteriormente foram sujeitos a ensaios que permitiram: caracterizar quanto ao diâmetro das partículas e determinar a quantidade necessária de cada material para a produção das argamassas. Nesse sentido, realizaram-se os ensaios de análise granulométrica (areia normalizada) e a baridade (areia normalizada, cal aérea, cinzas volantes conformes e cinzas volantes não conformes).

#### 4.3.1. Areia normalizada

A areia normalizada utilizada foi submetida aos ensaios de:

- Análise granulométrica, NP EN 933:1 – 2000 (IPQ, 2000)
- Determinação da baridade, Fe 15 UNL/DEC/Maio (UNL/DEC, 1996e)

##### *Análise granulométrica*

Define-se como granulometria a distribuição das percentagens das partículas segundo as dimensões que constituem um agregado. A dimensão de uma partícula é determinada pela abertura de uma malha através da qual passa, ficando retida na malha a seguir, mas com uma abertura menor. Assim sendo, a dimensão é caracterizada pela forma da malha (quadrada, circular, etc) e diferença entre as aberturas (Sousa-Coutinho, 1988).

De acordo com Sousa-Coutinho (1988), a granulometria é provavelmente a propriedade mais importante do agregado, a seguir à resistência mecânica. Esta propriedade influencia o desempenho das argamassas a nível da trabalhabilidade, compacidade e estrutura porosa (Sousa-Coutinho 1988).

##### i) Equipamentos e utensílios

- Pá
- Balança de precisão 0,01 g
- Peneiros ASTM com abertura da malha quadrada de 4,76 mm (n.º4), 2,38mm (n.º8), 1,19 mm (n.º16), 0,595mm (n.º30), 0,297 mm (n.º50), 0,149 mm (n.º100), 0,075 mm (n.º200)
- Agitador mecânico de peneiros

##### ii) Procedimento experimental, figura 4.4

- Pesou-se a areia normalizada que a embalagem continha ( $m = 1,3493$  kg)
- Colocou-se a areia no peneiro (n.º4). Os peneiros da série principal e com malha quadrada foram dispostos desde a maior abertura até ao refugo, no sentido de cima para baixo
- Peneirou-se mecanicamente o agregado durante 10 min
- Registou-se, após a peneiração, a massa retida em cada peneiro, incluindo o recipiente de fundo (refugo)
- Calcularam-se as percentagens relativas à massa inicial



a – pesagem do material inicial; b – colocação do material nos peneiros; c – agitador mecânico com a série de peneiros ASTM (peneiração); d – pesagem do material após a peneiração; e – separação do material segundo a sua granulometria.

Figura 4.4 – Ensaio de granulometria

### iii) Resultados

Os resultados são apresentados na tabela I.1 do anexo. A partir dos valores obtidos traçou-se a curva granulométrica, figura 4.5. A curva é uma linha contínua que relaciona o passado acumulado [%] (ordenadas) com a dimensão das malhas dos peneiros [mm] (abscissas) (Coutinho,1988).

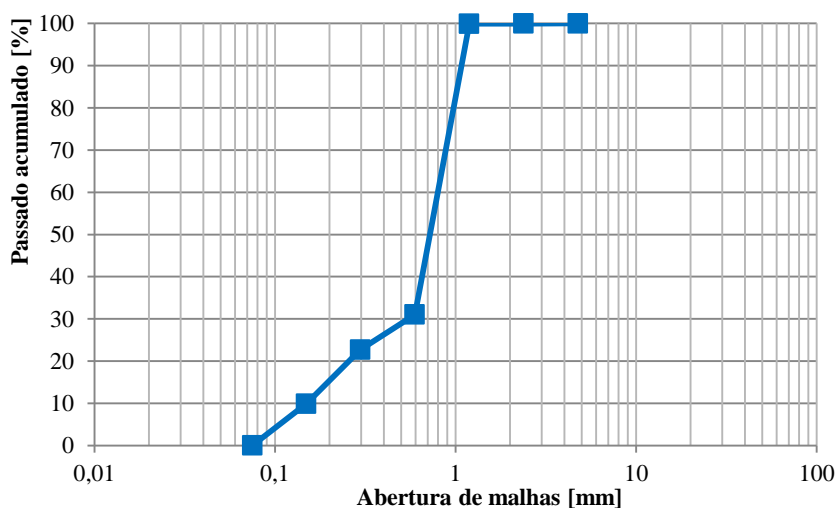


Figura 4.5 – Curva granulométrica da areia normalizada

Com a curva granulométrica pode-se retirar, tabela 4.1 (Coutinho,1988):

- Máxima dimensão do agregado, D, corresponde à menor abertura de malha do peneiro por onde passa uma quantidade de agregado superior ou igual a 90% (passado acumulado).
- Mínima dimensão do agregado, d, corresponde à maior abertura de malha do peneiro por onde passa uma quantidade inferior de agregado inferior ou a 5% (passado acumulado).
- Módulo de finura, MF, corresponde ao somatório do material retido acumulado (%) nos peneiros da série principal, excepto o nº 200, a dividir por 100. Uma análise desta característica pode ser a dimensão média ponderada do peneiro do grupo no qual é retida o material, sendo os peneiros contados a partir do mais fino.

Tabela 4.1 – Características físicas da areia normalizada

Material	Módulo de finura [ % ]	Máxima dimensão do agregado [mm]	Mínima dimensão do agregado [mm]
Areia Normalizada	3,36	1,19	0,075

**Determinação da baridade**

A baridade de um agregado é definida como a massa por unidade de volume do agregado contida num recipiente, incluindo os espaços entre as partículas e o recipiente (é um volume “aparente” maior do que o volume real que as partículas ocupam) (Pereira, 2008).

Esta característica física depende da maneira como as partículas se arranjam no recipiente, da sua forma e granulometria e do seu grau de compactação. Exemplo: se se preencher um recipiente com partículas de dimensões uniformes, estas organizam-se de uma determinada forma, mas se adicionar partículas com menores dimensões, os vazios ficam preenchidos e consequentemente, a baridade aumentará. Neste caso, para um mesmo volume do recipiente, a quantidade de material aumenta (Coutinho, 1988).

O presente ensaio permitiu quantificar de uma forma mais rigorosa a massa de cada constituinte necessário para a produção das cinco argamassas.

O ensaio foi realizado a todos os materiais e teve como referências a ficha de ensaio Fe 15 UNL/DEC e o trabalho de investigação desenvolvido V. Rato no DEC-FCT/UNL (elaborado segundo a norma NP EN 1097-3: 2002) (IPQ, 2002; Rato, 2006; UNL/DEC, 2000).

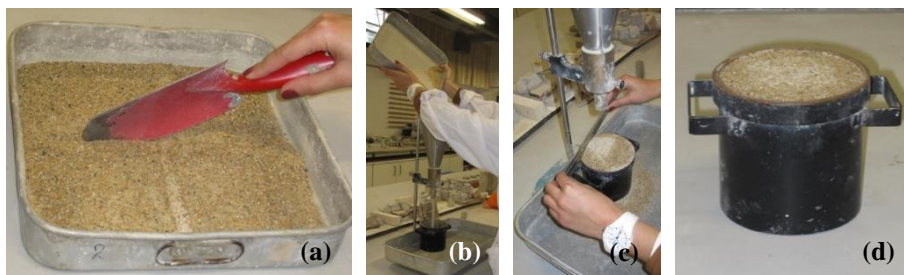
## i) Equipamentos e utensílios

- Balança com precisão de 0,01g
- Recipiente metálico cilíndrico com dimensões adequadas ( $V=750\text{cm}^3$ )
- Funil metálico em suporte de altura regulável
- Régua metálica
- Tabuleiro
- Varão de aço de 16mm de diâmetro com extremidade esférica

## ii) Procedimento experimental, figura 4.6

- Colocou-se o recipiente metálico cilíndrico numa balança e tarou-se
- Colocou-se o recipiente cilíndrico num tabuleiro por baixo do funil e regulou-se a uma altura de queda de 20cm
- Lançou-se o material em pequenas proporções através do funil para o recipiente cilíndrico, sempre que o funil ficou entupido, utilizou-se um varão metálico
- Após o enchimento total, nivelou-se a superfície rasando-a com uma régua metálica
- Pesou-se o recipiente e registou-se a massa

Os pontos descritos acima foram repetidos três vezes para determinar a média da baridade. No caso da areia normalizada esquadrelou-se em partes iguais para tornar a amostra representativa, permitindo que se tenha diferentes partes do material.



a – esquadrelamento da areia em 4 partes iguais; b – passagem para o recipiente cilíndrico através do funil metálico; d – nivelamento da superfície do recipiente cilíndrico; d – recipiente cilíndrico com areia.

Figura 4.6 – Ensaio de determinação da baridade da areia

### iii) Resultados

A expressão utilizada no cálculo da baridade [ $\text{Kg}/\text{m}^3$ ] é:

$$Ba = \frac{M}{V} \quad (4.1)$$

sendo: M a massa do recipiente completo com o material, exclui-se a massa do recipiente [ $\text{Kg}$ ]; V o volume do recipiente [ $\text{m}^3$ ].

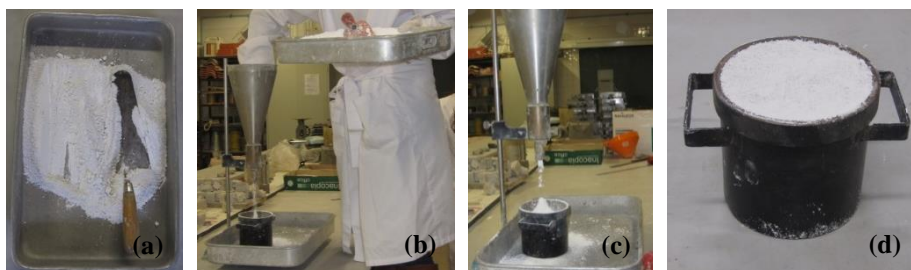
Tendo em conta as massas e o volume do recipiente, a partir da fórmula 4.1, calcularam-se as baridades para a areia normalizada e obteve-se a média.

O valor médio da baridade da areia normalizada é  $1627 \text{ kg}/\text{m}^3$ .

No anexo, na tabela I.2 apresentam-se as massas das três amostras representativas do agregado e os valores das baridades (individuais e média).

### 4.3.2. Cal aérea

A baridade da cal aérea foi determinada segundo o procedimento referido em 4.3.1, ilustrado na figura 4.7.



a – tabuleiro com cal aérea; b e c – passagem da cal aérea para o recipiente cilíndrico através do funil metálico; d – recipiente cilíndrico com cal aérea.

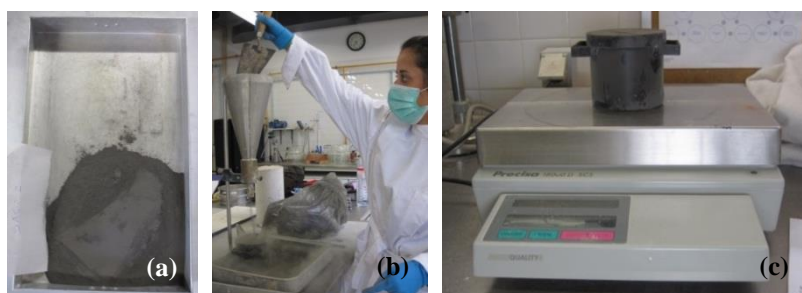
Figura 4.7 – Ensaio de determinação da baridade da cal aérea

Segundo a fórmula 4.1, calculou-se a média da baridade da cal aérea, obtendo-se um valor de  $294,84 \text{ kg/m}^3$ .

Os valores das massas e das baridades de cada amostra apresentam-se no anexo, na tabela I.2.

#### 4.3.3. Cinzas volantes conformes

Para a determinação da baridade das cinzas volantes conformes repetiu-se o procedimento mencionado em 4.3.1, figura 4.8.



a – tabuleiro com cinza volante conforme; b – passagem da cinza volante conforme para o recipiente cilíndrico através do funil metálico; c – pesagem da cinza volante conforme.

Figura 4.8 – Ensaio de determinação da baridade da cinza volante conforme

O valor médio da baridade da cinza volante conforme é  $949,78 \text{ kg/m}^3$  e foi determinado de acordo com a fórmula 4.1.

Os valores das massas e das baridades de cada amostra encontram-se na tabela I.2 do anexo.

#### 4.3.4. Cinzas volantes não conformes

O ensaio de determinação da baridade para as cinzas volantes não conformes foi realizado segundo o procedimento exposto em 4.3.1, figura 4.9.



a – tabuleiro com cinza volante não conforme; b – passagem da cinza volante não conforme para o recipiente cilíndrico através do funil metálico; c – nivelamento do recipiente cilíndrico que contém da cinza volante não conforme.

Figura 4.9 – Ensaio de determinação da baridade da cinza volante não conforme

A partir da fórmula 4.1, determinou-se a média da baridade da cal aérea, cujo resultado é  $772,62 \text{ kg/m}^3$ .

Na tabela I.2 (anexo) indicam-se os resultados das massas e das baridades de cada amostra.

#### 4.3.5. Síntese de resultados

Na figura 4.10 apresentam-se os valores médios e os desvios padrão das baridades da areia normalizada, cal aérea, cinzas volantes conformes e não conformes.

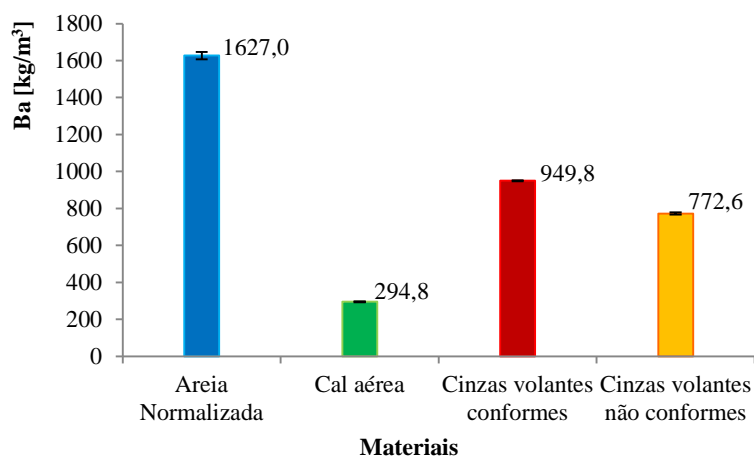


Figura 4.10 – Valores médios e desvios padrão dos materiais utilizados

#### 4.4. Produção das argamassas

Na presente secção descrevem-se os ensaios efectuados para a produção das amassaduras, caracterização das argamassas no seu estado fresco e moldagem dos provetes.

##### 4.4.1. Preparação das amassaduras

Na elaboração das argamassas utilizaram-se os constituintes mencionados na secção 4.2 ao traço volumétrico de 1:3 (ligante: agregado).

Na tabela 4.2 indicam-se as proporções utilizadas no ligante e nos aditivos e identificam-se os respectivos provetes.

Tabela 4.2 – Proporções utilizadas na produção das argamassas

Argamassas	Relação cal aérea/cinzas volantes		
	Cal aérea	Cinzas volantes conformes	Cinzas volantes não conformes
<b>A0</b>	6/6	-	-
<b>A1</b>	5/6	1/6	-
<b>A2</b>	4/6	2/6	-
<b>A3</b>	5/6	-	1/6
<b>A4</b>	4/6	-	2/6

Na produção das amassaduras considerou-se para cada tipo argamassa: 6 provetes prismáticos de 4cm×4cm×16cm (1536cm³) e um provete para o ensaio de aderência (argamassa aplicada sobre o tijolo) de 30cm×20cm×1,5cm (900cm³), optando-se por um volume final de 3150cm³. Para o cálculo do volume de referência utiliza-se o volume do ligante e tem-se em conta o traço volumétrico ( $1/3 \times 3150\text{cm}^3 = 1050\text{cm}^3$ ). Com as proporções referidas na tabela 4.2 multiplica-se cada fracção pelo volume de referência. De seguida, determina-se os traços volumétricos que



corresponde a cada uma das argamassas. Nesse sentido, na tabela 4.3 identificam-se os provetes e apresenta-se a composição ponderal (traço volumétrico) de cada uma das argamassas estudadas.

Tabela 4.3 – Composição ponderal das cinco argamassas

Argamassas	Nº Provetes	Composição ponderal	
<b>A0</b>	A0-1a A0-6	1:3	Ca:AN
<b>A1</b>	A1-1a A1-6	1:0,2:3,6	Ca:CVC: AN
<b>A2</b>	A2-1a A2-6	1:0,5:4,5	Ca: CVC: AN
<b>A3</b>	A3-1a A3-6	1:0,2:3,6	Ca:CVNC: AN
<b>A4</b>	A4-1a A4-6	1:0,5:4,5	Ca:CVNC: AN

Ca – cal aérea; CVC – cinzas volantes conformes; CVNC – cinzas volantes não conformes; AN – areia normalizada

Posteriormente, com as baridades determinadas na secção 4.3 obtêm-se as massas finais de cada constituinte, apresentadas na tabela I.3 do anexo. A quantidade de água utilizada dependeu da consistência desejada (ponto 4.4.2).

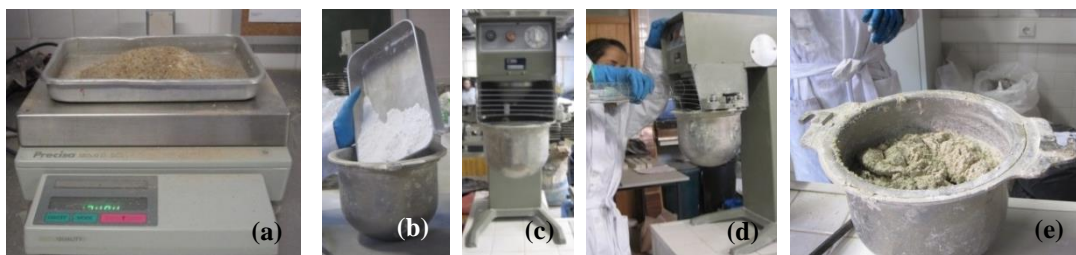
A preparação das argamassas foi feita de acordo com a ficha Fe 19 UNL/DEC (UNL/DEC, 1996f).

i) Equipamentos e utensílios

- Misturador de laboratório com dimensões normalizadas com uma pá capaz de efectuar movimentos de rotação axial à velocidade de 120 rpm e planetário a 60 rpm
- Balança com precisão de 0,01g
- Proveta graduada
- Cronómetro
- Colher de pedreiro

ii) Procedimento experimental, figura 4.11

- Pesou-se as massas determinadas anteriormente
- Colocou-se na cuba todos os materiais sólidos, misturando-se manualmente e a seco com o auxílio de uma colher de pedreiro (homogeneização da mistura)
- Entrada em funcionamento do misturador mecânico durante 45s, adicionando simultaneamente a água, previamente medida numa proveta graduada (a quantidade de água adicionada foi determinada no ensaio de espalhamento tendo em conta o factor  $a/l$ , ponto 4.4.2.)
- Limpou-se os bordos da cuba durante um intervalo 30s
- Accionou-se novamente o misturador durante mais 60s



a – pesagem do material; b – colocação do material na cuba; c – misturador mecânico; d – colocação da quantidade de água na mistura seca; e – mistura final

Figura 4.11 – Preparação das argamassas

Na tabela 4.4 apresenta-se a quantidade de água de amassadura utilizada em cada tipo de argamassa e a razão entre água ligante.

Tabela 4.4 – Quantidade de água e razão a/l

Argamassas	Água [ml]	Razão Água / cal aérea
A0	980	0,93
A1	850	0,97
A2	800	1,14
A3	850	0,97
A4	850	1,21

#### 4.4.2. Ensaio de caracterização das argamassas no estado fresco

Durante a preparação das amassaduras (argamassas) realizou-se o ensaio de consistência por espalhamento.

##### *Consistência por espalhamento*

O valor do espalhamento da argamassa no estado fresco permite medir e avaliar a trabalhabilidade da argamassa. Assim sendo, consoante a aplicação da argamassa determina-se a melhor consistência possível.

Este ensaio foi realizado simultaneamente com a preparação dos provetes de modo a avaliar o espalhamento da argamassa. Quando este valor não era o pretendido adicionou-se água e procedeu-se a uma nova homogeneização. O intervalo de espalhamento considerado variou entre 60% e 80%. A escolha deste intervalo teve como base outros trabalhos experimentais ao mesmo traço volumétrico e com os mesmos constituintes: 74% (Faria, 2004); 81% (Pinho, 2007) e 70 a 75% (Rato, 2006).

A campanha experimental teve como base a ficha de ensaio Fe 25 UNL/DEC (UNL/DEC, 1998).

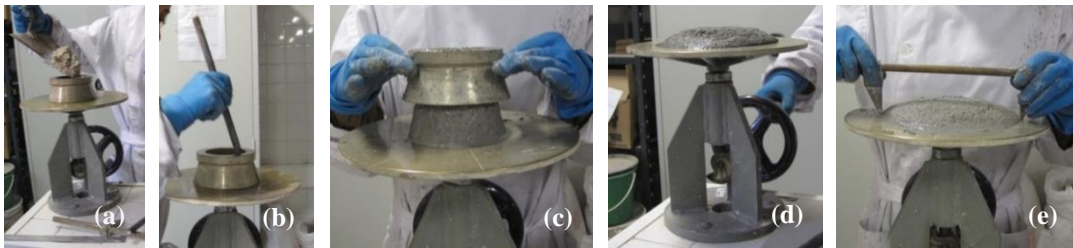
##### i) Equipamentos e utensílios

- Mesa de consistência
- Molde tronco-cónico
- Craveira

- Varão de compactação com 15mm de diâmetro
- Régua metálica
- Colher de pedreiro

ii) Procedimento experimental, figura 4.12

- Conferiu-se se o equipamento estava seco e limpo
- Colocou-se o molde no centro da mesa de consistência
- Encheu-se em duas camadas sensivelmente iguais, compactando 25 vezes cada uma com auxílio do varão
- Nivelou-se a superfície com uma colher de pedreiro
- Retirou-se com cuidado o molde na vertical
- Rodou-se a manivela durante 15s o que correspondeu a 15 pancadas
- Mediu-se com a craveira os quatros diâmetros gravados no tampo da mesa o afastamento entre dois pontos e registou-se



a – enchimento do molde tronco-cônico; b – compactação da primeira camada; c – remoção do molde; d, e – realização do ensaio

Figura 4.12 – Ensaio de consistência por espalhamento

iii) Resultados

Após, o registo dos valores dos quatro diâmetros calculou-se a sua média (tabela I.4, anexo) e determinou-se o resultado do espalhamento [%] com base na fórmula 4.2:

$$\text{Esp} = \left( \frac{d_{\text{med}} - 10}{10} \right) \times 100 \quad (4.2)$$

sendo:  $d_{\text{med}}$  o diâmetro médio dos quatros valores representados na mesa de consistência [cm]; 10 o diâmetro interior do molde do tronco-cônico [cm].

Os resultados do espalhamento (média) das cinco argamassas estão representados na tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Valores médios de espalhamento das argamassas frescas

Argamassas	Espalhamento [%]
A0	66,3
A1	74,3
A2	67,0
A3	73,0
A4	76,8

#### **4.4.3. Execução e cura dos provetes**

Após a preparação das amassaduras (argamassas), procedeu-se à moldagem e cura dos provetes prismáticos e dos provetes para o ensaio de aderência

##### ***Moldagem dos provetes prismáticos***

Este ensaio teve como propósito a compactação das argamassas, de modo a diminuir os espaços vazios.

A campanha experimental realizou-se segundo a ficha de ensaio Fe 19 UNL/DEC, cujo procedimento já se tinha iniciado na preparação das argamassas (UNL/DEC, 1996f).

##### **i) Equipamentos e utensílios**

- Compactador mecânico para os provetes
- Moldes prismáticos de 4cm×4cm×16cm
- Colher de pedreiro

##### **ii) Procedimento experimental, figura 4.13**

- Colocou-se o molde bem fixo na mesa do compactador
- Procedeu-se ao enchimento no molde de uma camada
- Compactou-se mecanicamente a 1ª camada com 20 pancadas
- Encheu-se o molde no total com uma segunda camada, sensivelmente igual à 1ª camada
- Compactou-se a última camada, também com 20 pancadas
- Retirou-se o excesso de argamassa
- Alisou-se a superfície com o auxílio da colher de pedreiro



a – compactador mecânico; b – colocação da pasta nos moldes prismáticos; c – moldes com a pasta no estado fresco.

Figura 4.13 – Moldagem e compactação dos provetes prismáticos

##### ***Moldagem dos provetes para o ensaio de aderência***

O presente ensaio teve como objectivo preparar o tijolo para o ensaio de aderência ao suporte.

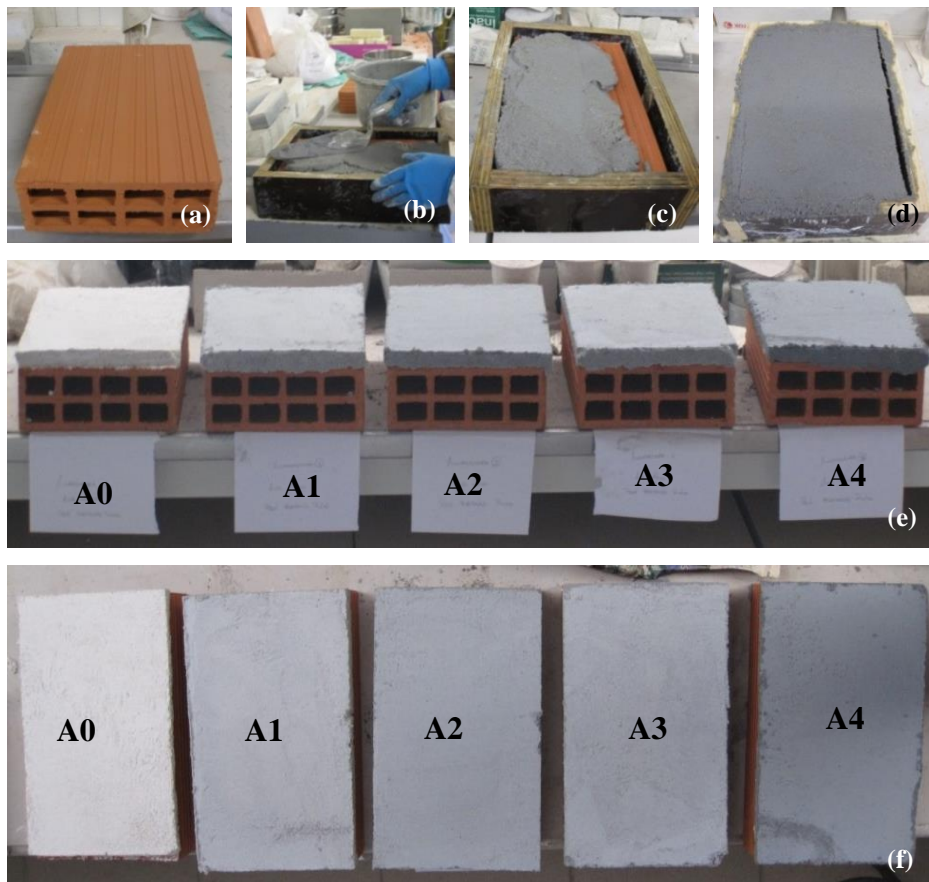
Na elaboração deste ensaio experimental seguiu-se a metodologia da ficha Fe 21 UNL/DEC (UNL/DEC 1996g).

i) Equipamentos e utensílios

- Estufa a uma temperatura ( $T=60\pm5^{\circ}\text{C}$ )
- Tijolos ( $300\text{cm}\times 200\text{cm}\times 40\text{cm}$ )
- Moldura de madeira (dimensões interiores:  $30,4\text{cm}\times 20,3\text{cm}\times 8,6\text{cm}$ ; espessura 2cm)
- Borrifador
- Colher de pedreiro

ii) Procedimento experimental, figura 4.14

- Colocou-se a moldura de madeira nos tijolos
- Borrifaram-se os tijolos. De seguida, espalhou-se a pasta da argamassa ao longo da superfície do tijolo e alisou-se com uma colher de pedreiro
- Acondicionaram-se os tijolos com a argamassa numa sala em ambiente controlado até atingir a cura



a – tijolo utilizado para o ensaio; b, c – colocação da amassadura; d – tijolo coberto com a amassadura; e, f – vistas das aplicações de argamassa no suporte cerâmico;

Figura 4.14 – Moldagem dos provetes para o ensaio de aderência

Depois da moldagem, os provetes prismáticos e os provetes para o ensaio de aderência (tijolos revestidos com as argamassas), figura 4.15, foram condicionados numa sala a uma temperatura ambiente durante sete dias, após esse período foram desmoldados.

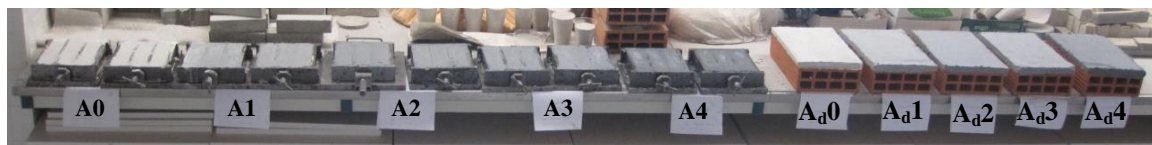


Figura 4.15 – Provetes prismáticos nos moldes e provetes para o ensaio de aderência

Depois da desmoldagem os provetes foram submetidos a cura seca, colocando-os na sala condicionada a uma temperatura  $T=20\pm2^{\circ}\text{C}$  e a uma humidade relativa  $H_r=60\pm5\%$  até à realização dos ensaios, figura 4.16.



a – provetes prismáticos de  $4\text{cm}\times4\text{cm}\times16\text{cm}$  desmoldados; b – provetes para o ensaio de aderência

Figura 4.16 – Provetes em ambiente de cura

Na figura 4.17 apresentam-se todos os provetes prismáticos de  $4\text{cm}\times4\text{cm}\times16\text{cm}$  realizados e a respectiva identificação.



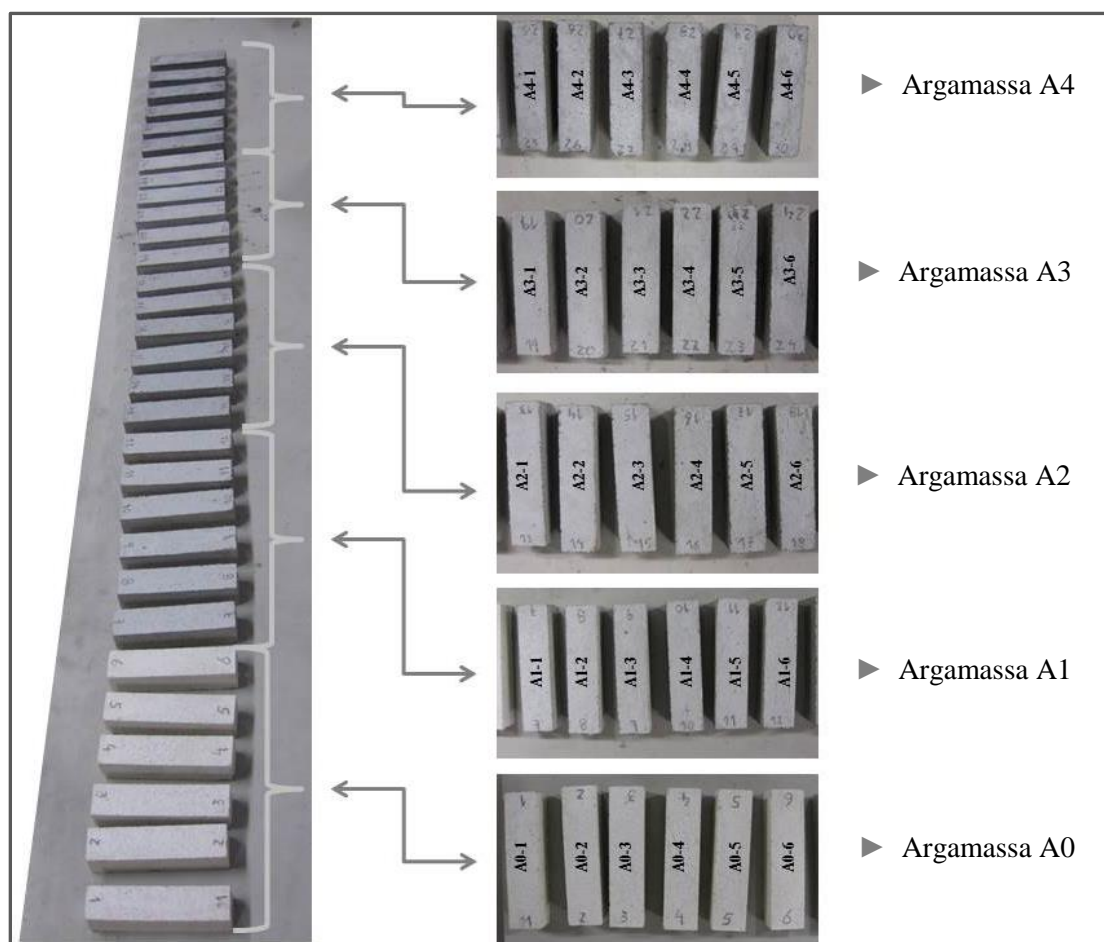
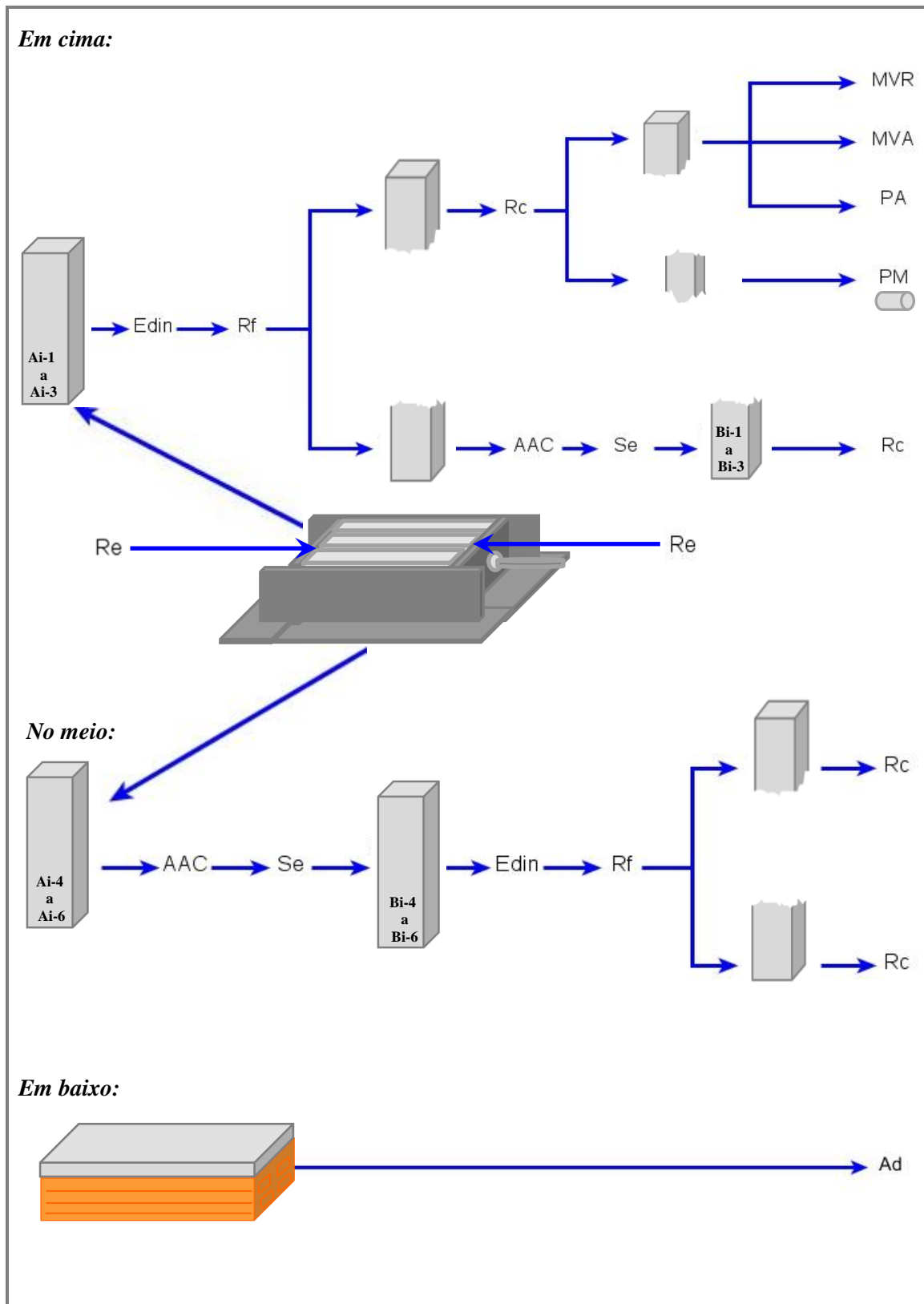


Figura 4.17 – Provetes prismáticos

#### 4.5. Ensaios de caracterização das argamassas no estado endurecido

Nesta secção descrevem-se os ensaios efectuados nas argamassas endurecidas para a sua caracterização física e mecânica. Os provetes foram divididos em dois tipos: provetes prismáticos e provetes para o ensaio de aderência. Os primeiros são constituídos por duas séries: Ai-1 a Ai-3 e Ai-4 a Ai-6, sendo que a letra “i” representa o tipo da argamassa, variando entre 0 e 4. A sequência de ensaios realizados nas duas séries de provetes prismáticos não foi a mesma, como se pode observar na figura 4.18. A distinção principal entre as duas séries é a determinação do módulo de elasticidade dinâmico e da resistência à tracção por flexão após o contacto com a água. A identificação dos provetes depois do contacto com a água (também submetidos ao ensaio de secagem) foi alterada, sendo a letra A substituída pela letra B, ex.: Bi-1 a Bi-3. Na figura 4.18 representa-se também os provetes para o ensaio de aderência. Todos os ensaios realizaram-se após os 90 dias.



**Em cima** – provetes prismáticos do tipo Ai-1 a Ai-3; **no meio** – provetes prismáticos do tipo Ai-4 a Ai-6; **em baixo** – provetes para o ensaio de aderência do tipo A<sub>ai</sub>-1 a A<sub>ai</sub>-3.

Re – retração; Edin – módulo de elasticidade dinâmico; Rf – resistência à flexão por tração; Rc – resistência à compressão; MVR – massa volúmica real; MVA – massa volúmica aparente; PA – porosidade aberta; PM – porosimetria de mercúrio; AAC – absorção de água por capilaridade; Se – secagem; Ad – aderência.

Figura 4.18 – Sequência de ensaios realizados a cada um dos tipos dos provetes



#### 4.5.1. Características físicas

As características físicas em estudo são a retracção, absorção de água por capilaridade, secagem, massa volúmica real e aparente, porosidade aberta e porometria de mercúrio.

##### *Retracção*

Em geral, a retracção (por estimativa) das argamassas é um fenómeno que está relacionado com a qualidade e durabilidade das argamassas. Para além, do módulo de elasticidade e das resistências (à compressão, à tracção por flexão), a retracção é outro dado importante para avaliação do desempenho das argamassas, essencialmente nas argamassas de revestimento de paredes. Neste tipo de argamassas, pretende-se que satisfaçam a estabilidade mecânica, estabilidade à incidência de cargas térmicas, contribuição para a estanquidade à água, durabilidade e que confirmem ao paramento um aspecto estético aceitável, entre outros requisitos. A argamassa é um elemento que está sujeito à variação do volume, desde o momento da amassadura até ao estado limite de equilíbrio com o ambiente, a temperatura constante e na ausência de cargas exteriores aplicadas. Esta variação resulta da interacção de fenómenos (contração ou retracção) (Bastos *et al*, 2005). As principais causas da retracção são (Bastos *et al*, 2005):

- Dessecação: a água que sai dos capilares para o exterior e depois dos poros de menores dimensões, provocando a retracção (contração) acompanhada por redução de massa (correspondente à perda de água). Este tipo de retracção resulta, sobretudo, da evaporação e da absorção por outros elementos em contacto. A dessecação é parcialmente reversível, isto é, quando o elemento submetido à dessecação for mergulhado em água, os capilares voltam a encher e o volume perdido é recuperado em parte.

- Hidratação: resulta dos novos compostos formados, da exotermia de algumas das reacções químicas (reacções de hidratação).

- Carbonatação: provem da combinação do dióxido de carbono da atmosfera com os componentes hidratados da cal aérea, nomeadamente com o hidróxido de cálcio que origina produtos sólidos, como o carbonato de cálcio. Estas três causas interagem entre si.

O presente ensaio tem um carácter qualitativo, permitindo apenas ter uma noção sobre a variação dimensional linear dos provetes. A medição da retracção deveria ter sido feita com uma craveira.

##### i) Equipamentos e utensílios

- Régua

##### ii) Procedimento experimental

- Mediu-se a variação unidimensional dos provetes no próprio molde, à superfície (distância entre o molde e os extremos do provete; no sentido longitudinal)

### iii) Resultados

Os valores da retracção medidos desde a moldagem até à desmoldagem apresentam-se no anexo na tabela I.5. Para o cálculo da extensão,  $\epsilon$ , [mm/m] considerou-se a fórmula 4.3, apresentando-se os resultados obtidos na tabela 4.6.

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (4.3)$$

sendo:  $\Delta l = L_1 + L_2$  (soma da distância entre os extremos do provete e o molde) [m];  $l = 0,16$  m (comprimento do provete).

Tabela 4.6 – Resultados de retracção de cada provete ensaiado

Argamassas	Provetes nº	$\epsilon$ [mm/m]
<b>A0</b>	A0-1	0,69
	A0-2	0,69
	A0-3	0,63
	A0-4	0,06
	A0-5	0,06
	A0-6	0,06
<b>A1</b>	A1-1	1,25
	A1-2	0,69
	A1-3	1,25
	A1-4	0,13
	A1-5	0,06
	A1-6	0,63
<b>A2</b>	A2-1	0,69
	A2-2	1,25
	A2-3	1,25
	A2-4	0,69
	A2-5	0,00
	A2-6	0,69
<b>A3</b>	A3-1	0,13
	A3-2	0,69
	A3-3	0,63
	A3-4	0,06
	A3-5	0,13
	A3-6	0,06
<b>A4</b>	A4-1	0,63
	A4-2	0,63
	A4-3	0,63
	A4-4	0,00
	A4-5	0,06
	A4-6	0,00

### *Absorção de água por capilaridade*

Este fenómeno traduz capacidade de uma argamassa em absorver água pelos seus vasos capilares, devido às diferenças de pressão entre a sua superfície livre e a sua superfície no interior dos vasos capilares. A absorção por capilaridade ocorre, predominantemente, quando uma das faces está em contacto com a água. O comportamento da argamassa face à acção da capilaridade depende

essencialmente das características da sua estrutura porosa, nomeadamente da quantidade e da dimensão dos poros (Carolina; 2010; Coutinho, 1988; Rato, 2006).

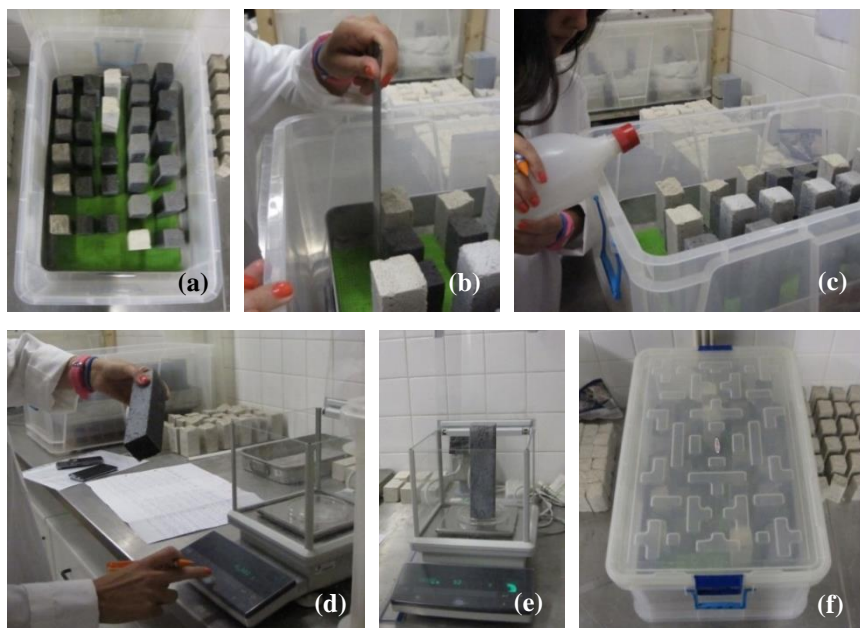
O presente ensaio foi realizado em idades diferentes: “meios provetes” (93 dias de idade) e provetes inteiros (92 dias de idade), segundo a ficha de ensaio Fe 06 UNL/DEC (UNL/DEC, 1999a).

i) Equipamentos e utensílios:

- Estufa ventilada ( $T=60\pm5^{\circ}\text{C}$ )
- Caixa de plástico
- Tabuleiro de alumínio
- Tijolo ( $300\text{cm}\times 200\text{cm}\times 40\text{cm}$ )
- Esguicho
- Régua metálica
- Balança de precisão não inferior a 0,01g
- Cronómetro

ii) Procedimento experimental, figura 4.19

- Acondicionou-se os provetes numa estufa
- Pesou-se os provetes, depois de secos,  $M_0$  (massa inicial)
- Colocou-se no fundo da caixa de plástica água em quantidade suficiente para criar condições de saturação. Posteriormente, pôs-se o tijolo para o tabuleiro não estar em contacto directo com a água
- No fundo do tabuleiro, colocou-se uma rede de plástico e encheu-se com água até a uma altura de 2mm; após a colocação dos provetes, era necessário que a altura de água se mantivesse, por isso, foi necessário a verificação com uma régua metálica da altura da água e sempre que necessário adicionou-se água com o esguicho
- Imergiu-se os provetes com a face de ensaio virada para baixo ( $40\text{cm}\times 40\text{cm}$ )
- Fechou-se a tampa da caixa
- Retirou-se os provetes da caixa, inclinou-se para cair o excesso de água e fez-se pesagens após 5, 15, 60, 180, 360 min e de 24 em 24 h, até atingir uma massa constante (a diferença entre as duas massas sucessivas, num intervalo de 24h, seja inferior a 0,1% da massa do provete). O ensaio terminou quando todos os provetes (“meios provetes” e provetes inteiros) atingiram massa constante



a – provetes (inteiros e “meios”) na caixa, vista de cima ; b – verificação do nível da água; c – colocação de água na base da caixa; d – excesso de água nos provetes; e – pesagem dos provetes; f – caixa fechada para permitir ambiente condicionado.

Figura 4.19 – Ensaio de absorção de água por capilaridade

### iii) Resultados

Após as diversas pesagens até atingir massa constante, determinou-se a quantidade de água absorvida,  $M_t$  [kg/m<sup>2</sup>], através da seguinte fórmula 4.4:

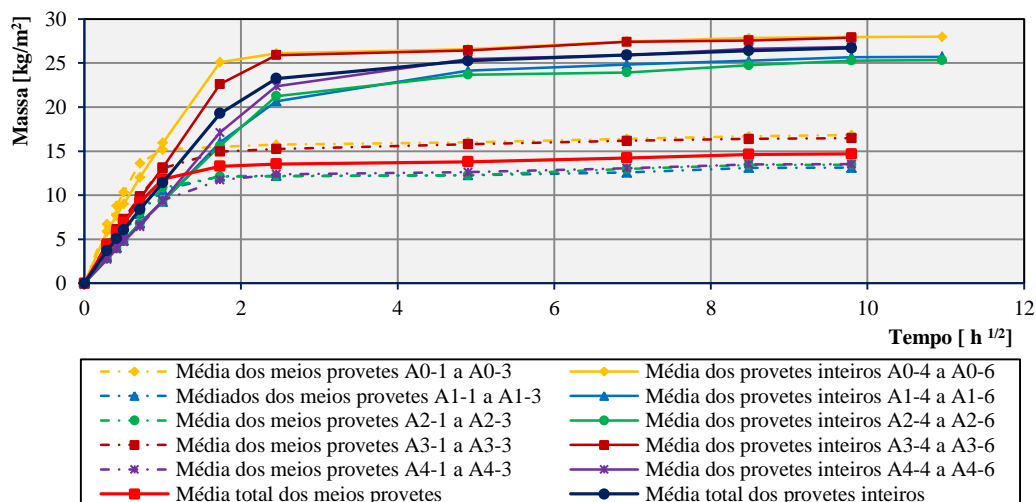
$$M_t = \frac{(M_0 - M_i)}{S} \quad (4.4)$$

sendo:  $M_i$  a massa do provete no instante  $t=i$  [kg];  $M_0$  a massa do provete seco [kg];  $S$  a área da face em contacto com a água ( $0,04 \times 0,04 = 0,0016$ ) [m<sup>2</sup>].

No anexo apresentam-se os valores obtidos da aplicação da fórmula 4.4 (tabelas I.6, I.8, I.10, I.12, I.14, I.16, I.18, I.20, I.22, I.24).

Com os valores obtidos, traçaram-se as curvas de absorção de água por capilaridade ao longo do intervalo de tempo  $t_i$ ; nas abcissas apresentou-se o tempo [h<sup>1/2</sup>] e nas ordenadas a quantidade de água absorvida [kg/m<sup>2</sup>], como se pode observar na figura 4.20, que representa apenas os valores médios dos “meios provetes” e dos provetes inteiros. Nesta figura, verifica-se que as curvas de absorção de água por capilaridade dos “meios provetes” e dos provetes inteiros não terminam ao mesmo tempo, pois foram ensaiados em diferentes idades, como mencionado anteriormente, sendo os primeiros, os provetes inteiros e no dia a seguir os “meios provetes”. Contudo, as curvas dos provetes inteiros não finalizam ao mesmo tempo, pois os provetes das argamassas A3 e A4 atingiram primeiro a massa constante.

No anexo apresentam-se as curvas de absorção de água por capilaridade de todos os provetes (“meios provetes”, provetes inteiros e as respectivas médias) nas figuras I.1a I.15.

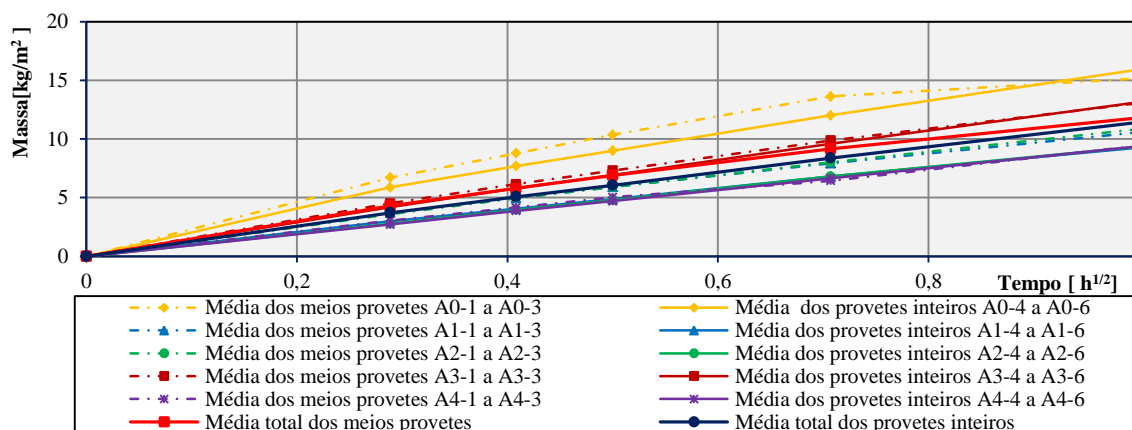


Argamassas	Provetes	Composição ponderal	
<b>A0</b>	A0-1a A0-6	1 : 3	Ca : AN
<b>A1</b>	A1-1a A1-6	1 : 0,2 : 3,6	Ca : CVC : AN
<b>A2</b>	A2-1a A2-6	1 : 0,5 : 4,5	Ca : CVC : AN
<b>A3</b>	A3-1a A3-6	1 : 0,2 : 3,6	Ca : CVNC : AN
<b>A4</b>	A4-1a A4-6	1 : 0,5 : 4,5	Ca : CVNC : AN

Ca – cal aérea; CVC – cinzas volantes conformes; CVNC – cinzas volantes não conformes; AN – areia normalizada

Figura 4.20 – Curvas da absorção de água por capilaridade

Na figura 4.21 representam-se os resultados médios da quantidade de água absorvida correspondente à primeira hora de ensaio. Nesta figura verifica-se que os troços iniciais do gráfico são aproximadamente constantes excepto, no troço dos “meios provetes” da argamassa A0 que próximo da primeira tem uma ligeira diminuição.



Argamassas	Provetes	Composição ponderal	
<b>A0</b>	A0-1a A0-6	1 : 3	Ca : AN
<b>A1</b>	A1-1a A1-6	1 : 0,2 : 3,6	Ca : CVC : AN
<b>A2</b>	A2-1a A2-6	1 : 0,5 : 4,5	Ca : CVC : AN
<b>A3</b>	A3-1a A3-6	1 : 0,2 : 3,6	Ca : CVNC : AN
<b>A4</b>	A4-1a A4-6	1 : 0,5 : 4,5	Ca : CVNC : AN

Ca – cal aérea; CVC – cinzas volantes conformes; CVNC – cinzas volantes não conformes; AN – areia normalizada

Figura 4.21 – Resultados médios do ensaio de absorção de água por capilaridade na 1ª hora

A partir das curvas de absorção de água por capilaridade determina-se o coeficiente de capilaridade e o valor assintótico. O coeficiente de capilaridade, que corresponde ao declive da recta referente à primeira hora de ensaio, traduz a velocidade inicial de absorção de água por capilaridade. O valor assintótico é a quantidade total de água absorvida. (Barra, 2011; Faria, 2004). Este parâmetro não foi determinado para os “meios provetes”, uma vez que, não são conhecidas as suas dimensões. Na tabela 4.7 apresentam-se os resultados médios e o desvio padrão do coeficiente de capilaridade, “meios provetes” (Ai-1 a Ai-3) e provetes inteiros (Ai-4 a Ai-6), e do valor assintótico, provetes inteiros (Ai-4 a Ai-6). Os valores individuais do coeficiente de capilaridade e do valor assintótico encontram-se nas tabelas I.7, I.9, I.11, I.13, I.15, I.17, I.19, I.21, I.23 e I.25 do anexo.

Tabela 4.7 – Coeficientes de capilaridade e valores assintóticos médios e desvios padrão das argamassas ensaiadas

Argamassas	Provetes nº	Coeficiente de capilaridade [ $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ ]		Valor assintótico [ $\text{kg/m}^2$ ]	
		Média	DP	Média	DP
<b>A0</b>	A0-1 a A0-3	12,02	2,45	-	-
	A0-4 a A0-6	14,12	0,29	28,00	0,34
<b>A1</b>	A1-1 a A1-3	9,65	0,28	-	-
	A1-4 a A1-6	8,90	0,39	25,72	0,05
<b>A2</b>	A2-1 a A2-3	10,17	0,28	-	-
	A2-4 a A2-6	9,24	0,29	25,33	0,05
<b>A3</b>	A3-1 a A3-3	11,97	0,86	-	-
	A3-4 a A3-6	12,59	0,60	27,92	0,20
<b>A4</b>	A4-1 a A4-3	8,79	0,29	-	-
	A4-4 a A4-6	9,34	0,27	26,82	0,27

### **Secagem**

O estudo do fenómeno de secagem é efectuado experimentalmente (ensaio de secagem), em condições ambientais definidas, a partir da determinação da curva de secagem (segundo RILEM, citado por Couto, 2010).

Este ensaio consiste em analisar a evolução da secagem do provete saturado (após a imersão em água) em condições ambientais controladas. Durante, a sua secagem o provete deve ter cinco das seis faces seladas de modo a permitir que o transporte da humidade seja unidirecional.

A secagem dos materiais porosos é um processo que tem três fases principais, figuras 4.22 e 4.23 (Gonçalves, 2007):

- 1ª Fase de secagem: Inicialmente, o material está saturado, logo os poros do material encontram-se preenchidos por água. Esta, no seu estado líquido, é transportada até à superfície do material por forças de capilaridade. Na superfície ocorre o processo de evaporação, originando uma diminuição do teor de humidade no material ao longo do tempo. É esperado que nesta fase o teor de humidade seja uniforme em todo o material. A taxa de secagem (ou 1ª fase) depende

apenas de parâmetros externos, tais como: temperatura, humidade relativa do ambiente e a velocidade do ar junto à superfície do material.

- 2ª Fase de secagem: Inicia-se quando a evaporação do fluxo capilar na superfície do material não é suficiente e para compensar a frente de secagem recua para o interior do material. Nesta transição, o teor de água atinge o valor crítico. A secagem nesta fase ocorre por dois processos: capilaridade – transporte da água no estado líquido até à frente de secagem e difusão – transporte da água no estado de vapor da frente de secagem até a superfície. O percurso de difusão do vapor aumenta à medida que ocorre o recuo da frente húmida, provocando uma secagem mais lenta.

- 3ª Fase de secagem: O teor de humidade do material vai diminuindo progressivamente na 2ª Fase e num determinado momento, a continuidade do líquido é interrompida nos capilares atrás da frente húmida (início da 3ª Fase). A partir desta altura a difusão do vapor “controla” o transporte de humidade em todo o material, assim sendo, esta fase de secagem é muito lenta. Apesar de nesta última fase tecnicamente considerar-se que o material está seco, existem aglomerados líquidos que persistem durante algum tempo nos poros de menores dimensões. A secagem ocorre até o material atingir o equilíbrio higroscópico.

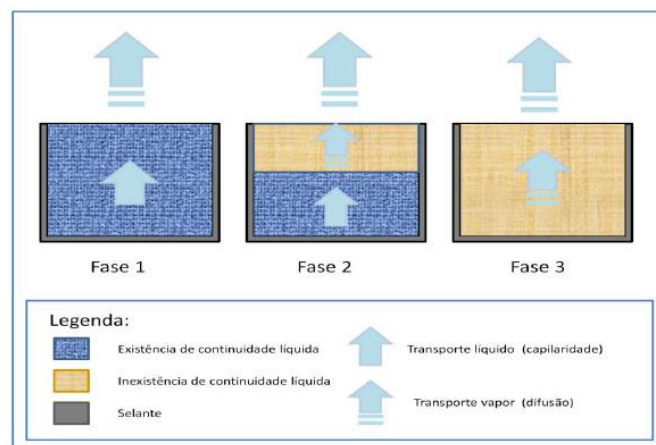


Figura 4.22 – Fases do processo de secagem (segundo Gonçalves, 2007 citado por Couto, 2010)

A curva típica de secagem de materiais porosos, figura 4.23, é obtida através de pesagens periódicas, a partir das quais se determina a variação do teor de água ao longo do tempo. Esta curva é constituída por um troço recto (1ª Fase) e por troços curvos (2ª e 3ª fases). O ponto de inflexão ocorre entre a 1ª Fase e 2ª Fase e corresponde ao teor de água crítico. Em relação à passagem da 2ª Fase para a 3ª Fase é geralmente indefinida (Gonçalves, 2007).

A forma das curvas de secagem depende de diferentes factores, tais como: propriedades do material, condições ambientais, forma da amostra, teor de água inicial e da evaporação ser uni ou multi-direccional (segundo RILEM citado por Couto, 2010).

O primeiro troço que corresponde à recta pode variar consoante o material, pois estes podem apresentar diferente porosidade e rugosidade, conduzindo a superfícies de evaporação distintas e, por conseguinte, a diferentes taxas de secagem (Gonçalves, 2007).

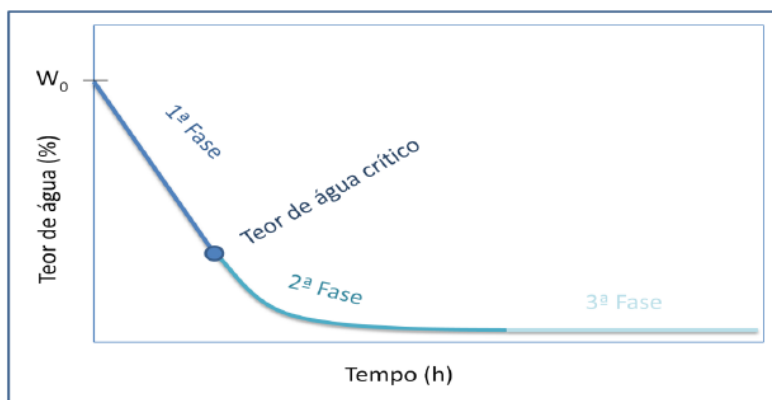


Figura 4.23 – Curva típica de secagem de materiais porosos (segundo Gonçalves, 2007 citado por Couto, 2010)

O ensaio de secagem é importante para a caracterização das argamassas, uma vez que, está relacionado com a sua durabilidade. A partir deste ensaio, pode-se analisar a capacidade das argamassas perante determinados mecanismos de degradação, nomeadamente problemas de humidade, tais como: infiltração, capilaridade e condensação (Pereira, 2008).

O presente ensaio foi realizado em idades diferentes: “meios provetes” (93 dias de idade) e provetes inteiros (92 dias de idade) numa sala com uma temperatura de  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$  e a uma humidade relativa de  $60\pm 5\%$ . O procedimento de ensaio foi elaborado segundo a ficha de ensaio Fe 07 UNL/DEC (UNL/DEC, 1996c).

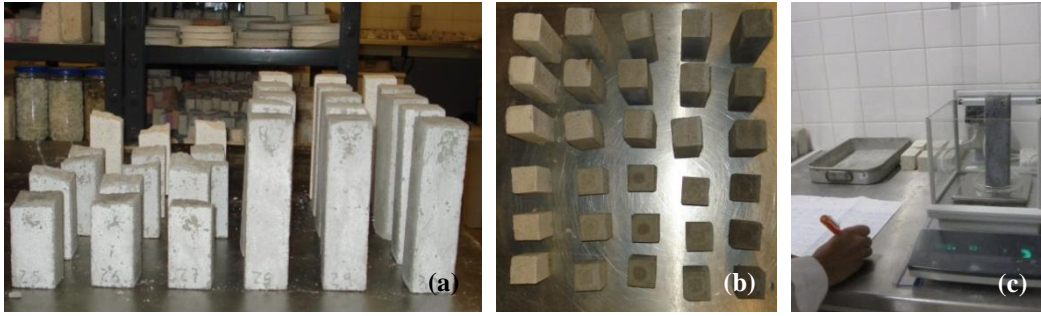
i) Equipamentos e utensílios

- Balança com precisão de 0,001g
- Cronómetro

ii) Procedimento experimental, figura 4.24

- Pesaram-se os provetes saturados,  $M_0$ , logo após o final do ensaio de absorção por capilaridade
- Colocaram-se os provetes numa sala acondicionada ( $T=20\pm 2^{\circ}\text{C}$  e  $HR=60\pm 5\%$ )
- Pesaram-se os provetes aos 5, 25, 30, 60, 120, 180, 240, 300, 360 min e de 24h em 24h, até atingir massa constante,  $M_i$  (a diferença entre as duas massas sucessivas, num intervalo de 24h, seja inferior a 0,01% da massa do provete)





a, b – provetes (inteiros e meios) na sala condicionada; c – pesagem dos provetes.

Figura 4.24 – Ensaio de secagem

### iii) Resultados

A seguir à última pesagem, calculou-se o teor de água,  $Q_i$  [%], para cada uma das determinações de massa efectuadas no intervalo de tempo  $t_i$ , utilizando a fórmula 4.5:

$$Q_i = \frac{M_i - M_0}{M_0} \times 100 \quad (4.5)$$

sendo:  $M_i$  a massa do provete em cada instante  $t_i$  [g];  $M_0$  a massa do provete seco [g].

No anexo apresentam-se os valores obtidos da aplicação da fórmula 4.5 (tabelas I.26, I.29, I.32, I.35, I.38, I.41, I.44, I.47, I.50, I.53).

A partir dos valores obtidos na presente campanha de ensaio, traçaram as curvas de secagem ao longo do intervalo de tempo  $t_i$ ; nas abcissas representou-se o tempo [h] e nas ordenadas o teor de água [%], como se pode observar na figura 4.25 que apresenta apenas os valores médios dos “meios provetes” e dos provetes inteiros. A curva apresentada não tem o desenvolvimento representativo de um material poroso como exemplificado anteriormente na figura 4.23. Nesta curva, observa-se que das 6 horas de ensaio até 2º dia (48 horas) a percentagem de teor de água manteve-se praticamente a mesma, isto é, a evaporação foi muito lenta.

No anexo representam-se as curvas de secagem de todos os provetes (“meios provetes”, provetes inteiros e as respectivas médias) nas figuras I.16 a I.30.

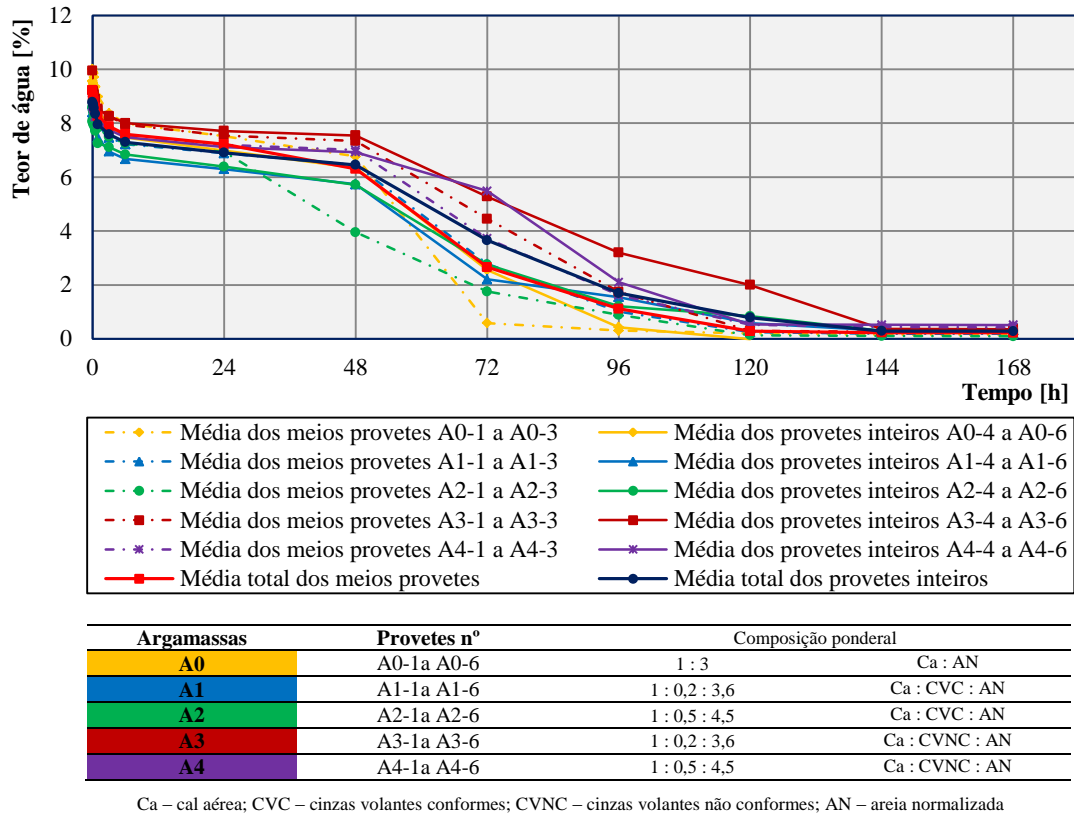


Figura 4.25 – Curvas de secagem

Com base nas curvas de secagem calcula-se a taxa de secagem que traduz a velocidade inicial de secagem e o índice de secagem que demonstra o comportamento de secagem ao longo prazo. A taxa de secagem (TS) corresponde ao declive da recta tangente ao troço inicial da curva de secagem e o índice de secagem, IS, é determinado segundo a fórmula 4.6 (Abreu, 2013; Barreto, 2010; Brito, 2009):

$$IS = \frac{\int_{10}^{t_f} f(Q_i) \times dt}{Q_{\max} \times t_f} \quad (4.6)$$

sendo:  $f(Q_i)$  a quantidade de água no interior do provete [%] em função do tempo, relativamente à massa seca;  $Q_{\max}$  a quantidade de água inicial [%], relativamente à massa seca;  $t_f$  o tempo final do ensaio [h].

Contudo, o índice de secagem foi calculado pelas somas sucessivas de trapézio, de acordo com a seguinte equação 4.7 (Abreu, 2013; Barreto, 2010; Brito, 2009):

$$IS = \frac{\sum_{i=1}^{i=ns} [(t_i - t_{i-1}) \times \frac{Q_{i-1} + Q_i}{2}]}{Q_{\max} \times t_f} \quad (4.7)$$

sendo:  $Q_i$  a quantidade de água no interior do provete no instante  $i$  [%], relativamente à massa seca;  $Q_{\text{máx}}$  a quantidade de água inicial [%], relativamente à massa seca;  $t_f$  o tempo final do ensaio [h];  $t_i$  o tempo  $i$  de ensaio [h];  $n_s$  o número de pesagens de controlo realizadas.

Como referido anteriormente as curvas determinadas não são típicas de um material poroso. No entanto, optou-se por determinar o índice de secagem e a taxa de secagem para compreender a sua relação com outras características. Na tabela 4.8 apresentam-se os resultados médios e o desvio padrão do índice de secagem e da taxa de secagem dos “meios provetes” (Ai-1 a Ai-3) e provetes inteiros (Ai-4 a Ai-6).

No anexo apresentam-se os resultados individuais da taxa de secagem nas tabelas I.27, I.30, I.33, I.36, I.39, I.42, I.45, I.48, I.51, I.54 e do índice de secagem nas tabelas I.28, I.30, I.34, I.37, I.40, I.43, I.46, I.49, I.52, I.55.

Tabela 4.8 – Índice de secagem e da taxa de secagem dos “meios provetes” e dos provetes inteiros

Argamassas	Provetes nº	Índice de secagem [-]		Taxa secagem [kg/m <sup>2</sup> .h]	
		Valor médio	Desvio padrão	Valor médio	Desvio padrão
<b>A0</b>	A0-1 a A0-3	0,28	0,014	1,04	0,067
	A0-4 a A0-6	0,29	0,021	1,08	0,005
<b>A1</b>	A1-1 a A1-3	0,31	0,013	0,79	0,035
	A1-4 a A1-6	0,29	0,034	0,94	0,111
<b>A2</b>	A2-1 a A2-3	0,25	0,026	0,56	0,166
	A2-4 a A2-6	0,30	0,071	0,82	0,151
<b>A3</b>	A3-1 a A3-3	0,37	0,047	1,09	0,731
	A3-4 a A3-6	0,43	0,059	0,70	0,096
<b>A4</b>	A4-1 a A4-3	0,35	0,050	0,82	0,150
	A4-4 a A4-6	0,38	0,033	0,70	0,099

#### ***Massa volúmica real, massa volúmica aparente e porosidade aberta***

A porosidade aberta indica a percentagem de volume de poros presentes no interior da argamassa e as massas volúmicas representam o quociente entre a massa e o volume, sendo a massa volúmica aparente a que contabiliza os poros existentes no material.

Estes ensaios contribuem para a sua avaliação enquanto características intrínsecas às argamassas, permitindo a justificação e a compreensão de determinados resultados obtidos por outros ensaios, bem como eventual relação entre estes (Santos, 2009b).

As características mecânicas, nomeadamente, o módulo de elasticidade dinâmico e as resistências mecânicas, são exemplos de características que podem ser interpretadas com o auxílio das massas volúmicas e da porosidade aberta. Quanto maior a massa volúmica, maior o módulo de elasticidade dinâmico, mais compacto é o material e, consequentemente, tem menos poros (a compacidade e a porosidade são propriedades inversas). Quanto menor a porosidade, mais compacto, logo as resistências mecânicas são mais elevadas (Barreto, 2010).

O procedimento experimental para a determinação das massas volúmicas e da porosidade aberta foi de acordo com as fichas Fe 01 e Fe 02 UNL/DEC, respectivamente (UNL/DEC,1996a; UNL/DEC, b).

i) Equipamentos e utensílios

- Estufa ventilada ( $T=60\pm5^{\circ}\text{C}$ )
- Balança com precisão de 0,001g
- Excicador
- Bomba de vácuo
- Mangueira de plástico
- Caixa de plástico
- Água destilada

ii) Procedimento experimental, figura 4.26

- Colocaram-se os provetes numa estufa ventilada a uma temperatura de  $60\pm5^{\circ}\text{C}$ , até alcançar massa constante (verificou-se quando a diferença entre as massas foi inferior a 0,1%)
- Pesou-se a massa,  $M_1$ , (em gramas) após atingidas condições anteriores
- Introduziram-se os provetes dentro do excicador e fechou-se. De seguida, ligou-se a bomba de vácuo de modo a que a pressão diminui-se, até atingir os 2667Pa (20mm de mercúrio), mantendo-se assim durante 24horas
- Fez-se penetrar a água (a uma temperatura 15 a  $20^{\circ}\text{C}$ ) lentamente, a partir de uma caixa que estava mais elevada, até imersão total dos provetes (operação que demorou aproximadamente 15min). Estes foram mantidos imersos e à pressão referida anteriormente durante 24horas
- Desligou-se a bomba de vácuo e deixaram-se os provetes imersos no intervalo de 24 horas à pressão atmosférica
- Após este período, procedeu-se à pesagem em imersão  $M_2$  (pesagem hidrostática)
- Retiraram-se os provetes submersos, enxugou-se com um pano húmido e obteve-se a massa  $M_3$  dos provetes saturados



a – colocação dos provetes no excicador; b – provetes em imersão em vácuo; c – provetes em imersão.

Figura 4.26 – Ensaio de determinação das massas volúmicas

## iii) Resultados

Estas características foram determinadas pelas seguintes expressões:

- a. Massa volúmica real, MVR, [Kg/m<sup>3</sup>]

$$\text{MVR} = \frac{M_1}{M_1 - M_2} \times 10^3 \quad (4.8)$$

- b. Massa volúmica aparente, MVA, [Kg/m<sup>3</sup>]:

$$\text{MVA} = \frac{M_1}{M_3 - M_2} \times 10^3 \quad (4.9)$$

- c. Porosidade aberta, PA [%]:

$$\text{PA} = \frac{M_3 - M_1}{M_3 - M_2} \times 100 \quad (4.10)$$

sendo: M<sub>1</sub> a massa inicial [g]; M<sub>2</sub> a massa dos provetes submerso (pesagem hidrostática) [g]; M<sub>3</sub> a massa dos provetes saturados [g].

Na tabela 4.9 apresentam-se os valores médios e os desvios padrão das massas volúmicas (aparente e real) e da porosidade aberta determinados através das fórmulas 4.8, 4.9 e 4.10. Na tabela I.56 do anexo referem-se os valores de cada provete das cinco argamassas.

Tabela 4.9 – Massas volúmicas e porosidade aberta médias e desvios padrão das argamassas ensaiadas

Argamassas	Idade	MVR [kg/m <sup>3</sup> ]		MVA [kg/m <sup>3</sup> ]		PA [%]	
		Média	DP	Média	DP	Média	DP
<b>A0</b>	116 dias	2398,5	9,9	1880,2	8,0	21,6	0,3
<b>A1</b>		2430,0	4,7	1957,5	12,9	19,4	0,5
<b>A2</b>		2416,9	9,3	1975,1	6,6	18,3	0,3
<b>A3</b>		2422,2	24,3	1937,0	11,7	20,0	0,3
<b>A4</b>		2454,1	11,8	1957,5	17,4	20,2	1,0

### Porosimetria de mercúrio

A porosimetria de mercúrio é uma técnica de caracterização do sistema poroso dos materiais. A partir desta técnica, é possível relacionar o tamanho, o volume de distribuição e a densidade dos poros (Rato, 2006).

Nesta técnica utiliza-se um líquido que “não molha”, o mercúrio, assim sendo, este não vai penetrar espontaneamente nos poros por acção capilar, mas sim pela aplicação de uma pressão externa. A pressão requerida é inversamente proporcional ao tamanho dos poros, ou seja, para introduzir o mercúrio em poros grandes é necessária apenas uma ligeira pressão, nos poros pequenos, a pressão exercida tem que ser mais elevada. A intrusão de mercúrio tem que ser

progressiva e sob pressões rigorosamente controladas. É de reforçar, quanto mais precisas forem as medidas de pressão, mais rigorosos serão os dados sobre os tamanhos dos poros. Este método é composto por duas etapas: a primeira equivale a uma pressão máxima ligeiramente superior à pressão atmosférica (baixa pressão) e a segunda à pressão máxima apontada pelo operador (alta pressão) (Rato, 2006).

O procedimento experimental foi realizado segundo o trabalho de investigação do V. Rato (Rato, 2006). Este ensaio foi apenas realizado a um provete de cada tipo de argamassa (A0 a A4), devido a limitações técnico-económicas.

i) Equipamentos e utensílios

- Estufa a 40°C
- Caixa de petri
- Porosímetro de mercúrio Autopore IV
- Serrote cabo de faca

ii) Procedimento experimental

- Reduziram-se os provetes de modo a serem colocados num penetrómetro com um volume de 5cm<sup>3</sup>
- Colocaram-se os provetes na estufa até serem ensaiados
- Pesou-se a amostra
- Colocou-se a amostra no penetrómetro e selou-se com uma massa o bordo do mesmo. De seguida colocou-se a tampa do penetrómetro e lubrificou-se a sua haste. Pesou-se o conjunto
- Inseriu-se o conjunto na “porta” de baixa pressão do porosímetro. A amostra atingiu o vácuo. Numa primeira fase reduziu-se significativamente a pressão no penetrómetro, com uma pressão de 100µmHg durante 5min para estabilizar. De seguida, foi introduzida a quantidade de mercúrio suficiente para o enchimento do espaço vazio da cápsula e da haste do penetrómetro. O processo iniciou-se com um aumento gradual de pressão que provocou a intrusão de mercúrio na estrutura porosa do provete, definido previamente por 15 patamares com valores entre 0,0138MPa (amostra em vácuo) e 0,2068MPa. Por cada patamar de baixa pressão considerou-se um tempo de estabilização de 15 segundos
- Retirou-se o penetrómetro e pesou-se novamente o conjunto
- Introduziu-se o penetrómetro na “porta” de alta pressão do porosímetro. Nesta fase foram estabelecidos 67 patamares de pressão de intrusão com valores entre 0,2758MPa e 206,8427MPa. Por cada patamar de alta pressão, considerou-se um tempo de estabilização de 30 segundos

## iii) Resultados

O programa informático regista o volume de mercúrio introduzido no provete que corresponde ao volume de poros atingíveis. Os valores registados foram abordados de forma a obter-se o conjunto de volumes de poros que têm um determinado diâmetro que é calculado a partir da equação 4.11 (programa informático) (Rato, 2006):

$$D = \frac{-4 \times \sigma \times \cos \theta}{P} \quad (4.11)$$

sendo: D o diâmetro poros [m];  $\sigma$  tensão superficial do mercúrio [N/m];  $\theta$  o ângulo de contacto entre o mercúrio e as paredes dos poros [°]; P pressão exercida [Pa].

A apresentação de gráficos, mais usual, é o volume de mercúrio em ordenadas e a dimensão dos poros em abcissas. Contudo, também é possível obter um vasto conjunto de informações adicionais, tais como: as massas volúmicas aparente e específica, a porosidade aberta e a área superficial dos poros (Rato, 2006).

A presente técnica de ensaio tem algumas limitações, pois considera que a forma do poro é cilíndrica e apresenta uma distribuição heterogénea de poros com dimensões muito variadas; deve-se ter em consideração estas duas restrições no tratamento de dados, considerando por isso uma margem de erro (Rato, 2006).

As figuras 4.27 a 4.31 correspondem às argamassas de A0 a A4, representando duas curvas: intrusão cumulativa e a intrusão incremental. A primeira curva traduz a quantidade de mercúrio introduzida e a segunda representa a quantidade de mercúrio introduzida por cada diâmetro de poro. Estas curvas permitem relacionar a quantidade de mercúrio inserido com a quantidade de poros com um determinado diâmetro. Nesse sentido, optou-se por explicar a relação das duas curvas apenas no gráfico da argamassa de referência (A0). Nas cinco figuras representam-se também duas rectas verticais, que correspondem ao diâmetro superior e inferior dos poros capilares; assim sendo limita-se o estudo ao intervalo [10nm; 10 $\mu$ m] (Rato, 2006).

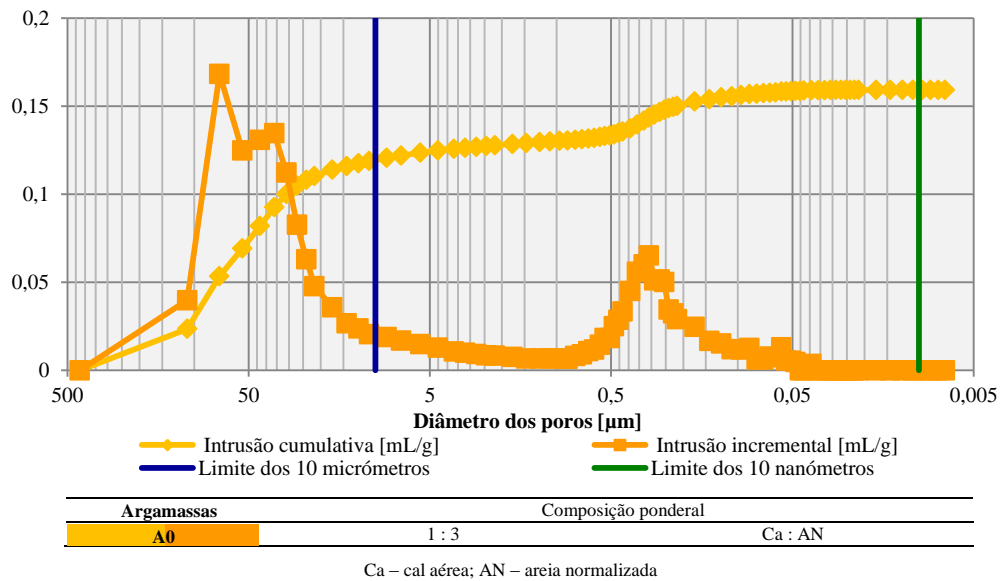


Figura 4.27 – Porosimetria de mercúrio da argamassa A0

Análise da figura 4.27:

- Cada ponto da curva intrusão incremental representa a derivada da curva intrusão cumulativa, portanto quanto maior a derivada (declive), maior é a quantidade de poros desse diâmetro.
- Quando a curva intrusão cumulativa é praticamente horizontal significa que entrou pouco mercúrio, logo a quantidade dos poros com um determinado diâmetro é pequena.

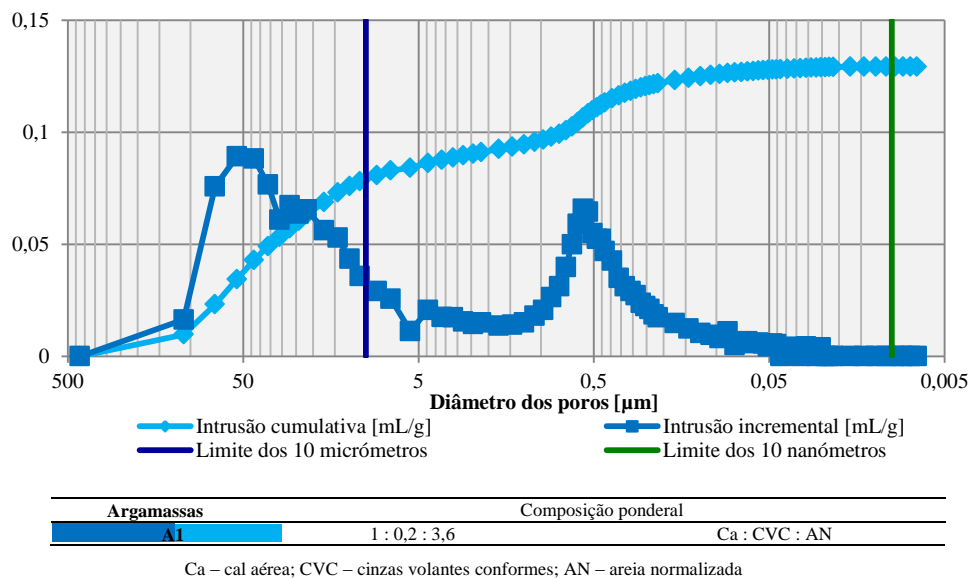


Figura 4.28 – Porosimetria de mercúrio da argamassa A1



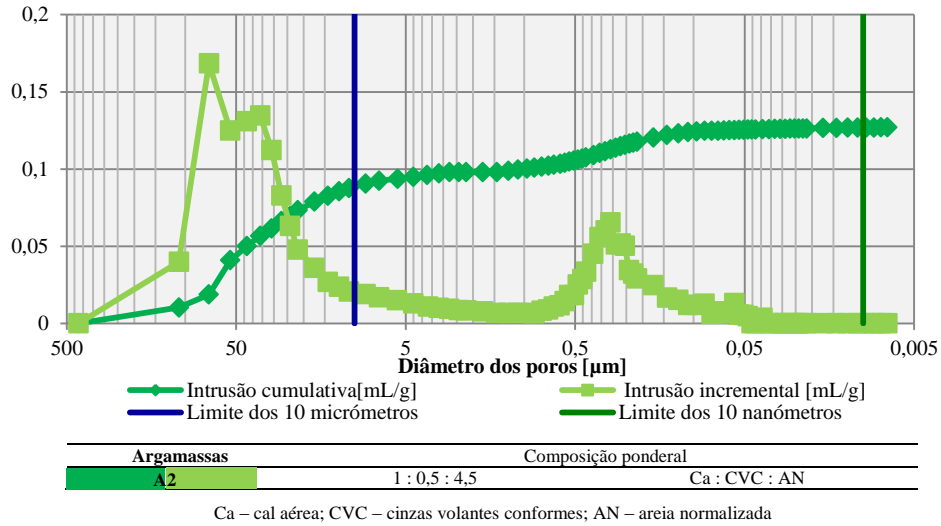


Figura 4.29 – Porosimetria de mercúrio da argamassa A2

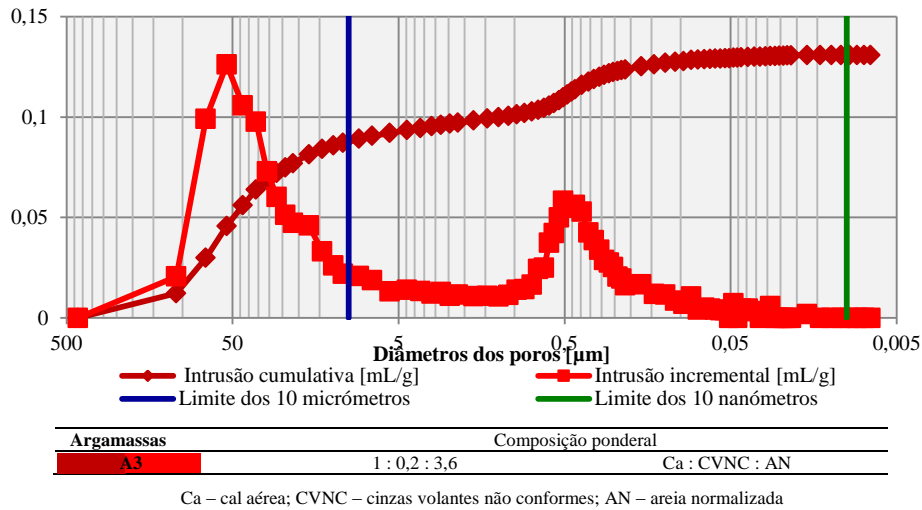


Figura 4.30 – Porosimetria de mercúrio da argamassa A3

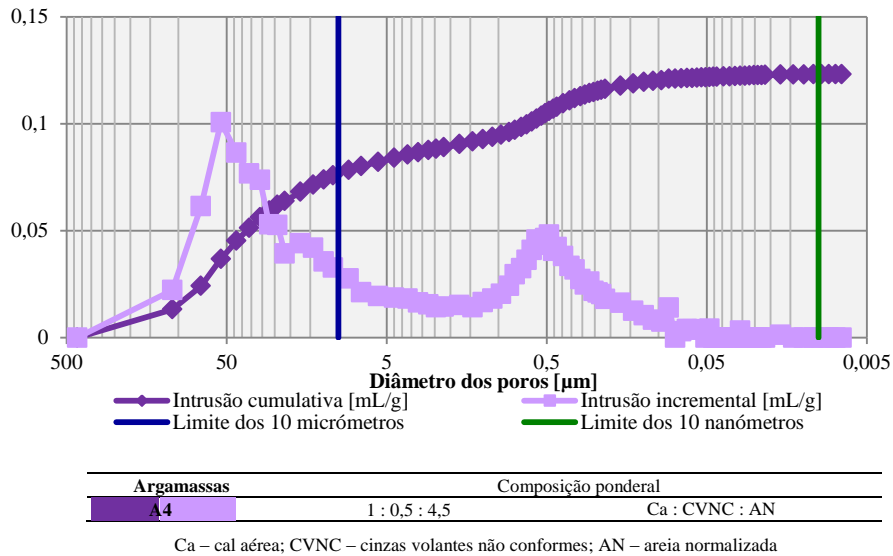


Figura 4.31 – Porosimetria de mercúrio da argamassa A4

Como mencionado anteriormente, é possível retirar do programa os valores obtidos das massas volúmicas (aparente e real) e da porosidade aberta, representados na tabela 4.10. Estes valores apenas serviram de referência aos obtidos por pesagem hidrostática.

Tabela 4.10 – Massas volúmicas e porosidade aberta obtidos no ensaio de porosimetria de mercúrio

Argamassas	MVR [kg/m <sup>3</sup> ]	MVA [kg/m <sup>3</sup> ]	PA[%]
A0	2548,3	1812,7	28,9
A1	2610,1	1952,0	25,2
A2	2745,3	2036,1	25,8
A3	2659,1	1972,9	25,8
A4	2603,0	1971,5	24,3

#### 4.5.2. Características mecânicas

As características mecânicas em estudo são o módulo de elasticidade dinâmico, a resistência à tracção por flexão, a resistência à compressão e a aderência ao suporte. Como representado na figura 4.17 da secção 4.5, os ensaios do módulo de elasticidade dinâmico e as resistências mecânicas (à tracção por flexão e à compressão) foram realizados antes (90 dias) e após o contacto com a água (111 dias).

##### *Módulo de elasticidade dinâmico*

O módulo de elasticidade pode ser determinado pelo método dinâmico ou pelo método estático. O primeiro não é destrutivo, podendo ser realizado em qualquer idade, ao contrário do segundo. Contudo, os resultados obtidos pelo método estático são mais precisos do que os obtidos pelo método dinâmico. Este último método é muito susceptível a erros tais como: a compactação da argamassa, a ausência de uma superfície lisa provocada pela desmoldagem e ao posicionamento do provete no aparelho, influenciando assim, uns bons resultados (Penas, 2008; Pereira, 2008)

O módulo de elasticidade permite aferir a deformabilidade / homogeneidade do material. Por exemplo, valores baixos do módulo de elasticidade implicam valores baixos de rigidez; assim sendo, o material é mais deformável. No entanto, também é possível relacionar com a homogeneidade do material; valores baixos do módulo de elasticidade correspondem a um material menos homogéneo, logo menos compacto.

Nesta campanha experimental optou-se que a determinação do módulo de elasticidade fosse pelo método dinâmico, o qual foi determinado através da medição da frequência de ressonância longitudinal do provete de ensaio (UNL/DEC, 1996d).

O presente ensaio seguiu as indicações da ficha de ensaio Fe 08 UNL/DEC (UNL/DEC, 1996d).

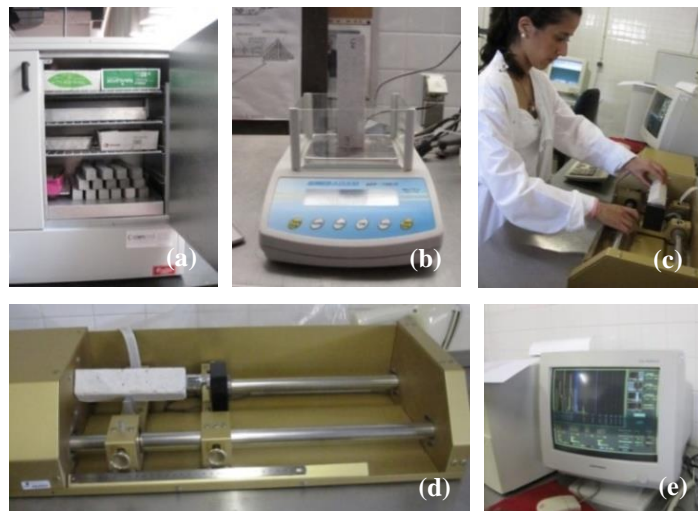
##### i) Equipamentos e utensílios

- Estufa ventilada ( $T=60\pm5^{\circ}\text{C}$ ) até atingirem massa constante
- Balança com precisão 0,01g

- Equipamento adequado para a emissão de vibrações e registo da frequência de ressonância longitudinal correspondente

ii) Procedimento experimental, figura 4.32

- Secaram-se os provetes numa estufa ventilada e pesaram-se
- Colocaram-se os provetes no equipamento, psicionando numa extremidade fonte emissora e na outra a receptora
- Ligou-se o oscilador de frequência variável que alimenta o vibrador e registou-se as amplitudes das vibrações. As condições de ressonância estão criadas quando se alcançam as amplitudes máximas. A frequência de ressonância fundamental longitudinal corresponde à frequência mais baixa para a qual se obtém a amplitude máxima
- Efectuaram-se duas determinações para cada provete, colocando a fonte emissora em cada uma das suas extremidades (as quais não devem diferir mais do que 5%), ou seja, alterou-se a posição do provete, trocando as faces do provete correspondentes à emissão e recepção das vibrações. A frequência longitudinal é dada pela média dos dois valores



a – provetes prismáticos na estufa; b – pesagem dos provetes prismáticos; c – colocação do provete no equipamento; d, e – equipamento e software que para o processamento de dados.

Figura 4.32 – Ensaio do módulo de elasticidade dinâmico

iii) Resultados

O módulo de elasticidade dinâmico,  $E_{\text{din}}$ , [MPa] foi determinado automaticamente por um software que também fornece os valores da frequência de ressonância. Neste software introduziram-se as massas dos provetes e as suas dimensões (4cm×4cm×16cm). Esta característica que o software gera é obtida através da equação 4.12:

$$E_{\text{din}} = (2 \times L \times f_0)^2 \times \frac{\rho}{g} \times 10^{-6} \quad (4.12)$$

sendo: L o comprimento do provete [m];  $f_0$  a frequência de ressonância longitudinal [Hz];  $\rho$  a massa volúmica [ $\text{N/m}^3$ ]; g a aceleração da gravidade,  $9,81 \text{ m/s}^2$ .

Na tabela 4.11 apresentam-se os resultados médios e os desvios padrão do módulo de elasticidade dos provetes. Nas tabelas I.57 e I.58 do anexo estão indicados os valores de cada provete das cinco argamassas.

Tabela 4.11 – Módulos de elasticidade médios e desvios padrão das argamassas ensaiadas

Argamassas	Provetes nº	Idades [dias]	$E_{\text{din}}$ [MPa]	
			Média	DP
A0	A0-1 a A0-3	90	3318,3	2903,3
	B0-4 a B0-6	111 <sup>(1)</sup>	5639,8	80,0
A1	A1-1 a A1-3	90	7405,0	175,1
	B1-4 a B1-6	111	7726,7	349,8
A2	A2-1 a A2-3	90	8056,0	432,5
	B2-4 a B2-6	111	9509,4	26,9
A3	A3-1 a A3-3	90	5594,9	342,0
	B3-4 a B3-6	111	7363,8	151,5
A4	A4-1 a A4-3	90	7416,1	176,4
	B4-4 a B4-6	111	8130,6	291,6

<sup>(1)</sup> Provetes ensaiados após contacto com a água.

### Resistência à tracção por flexão e à compressão

As resistências mecânicas são determinadas pela capacidade das argamassas terem um estado de endurecimento interno capaz de acomodar solicitações de esforços de diferente natureza. Estas propriedades estão relacionadas com o desenvolvimento da carbonatação, hidratação, porosidade, dosagem de ligante e granulometria. Por exemplo, valores elevados de porosidade (volume de vazios alto) conduzem, normalmente, a uma baixa resistência mecânica (Faria, 2004; Agostinho, 2008).

A metodologia utilizada nestes ensaios foi de acordo com a ficha de ensaio Fe 27 UNL/DEC (UNL/DEC, 1999b).

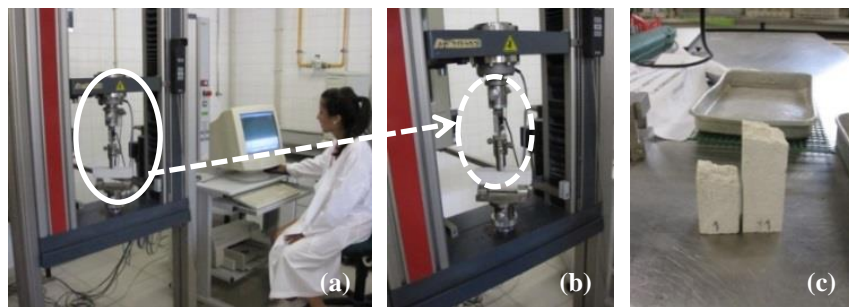
#### i) Equipamentos e utensílios

- Estufa a uma temperatura ( $T=60\pm5^\circ\text{C}$ ) até atingirem massa constante
- Máquina universal de tracção (ligada a um computador com o respectivo software de ensaio)
- Suporte para ensaio de flexão
- Suporte para ensaio de compressão

#### ii) Procedimentos experimentais

- a. Ensaio de resistência à tracção por flexão, figura 4.33

- Secaram-se os provetes numa estufa ventilada e pesaram-se
- Colocou-se na máquina universal de tracção uma célula de carga de 50KN (peça metálica) que incide a meio vão do provete a uma velocidade de 5,1 mm/min.
- Colocaram-se os provetes sobre o suporte para o ensaio de flexão, devidamente centrados, com os pontos de apoio distanciados de 100mm e as faces de moldagem em contacto com as superfícies que transmitem a carga
- Aplicou-se a carga. Esta foi iniciada por uma pré-carga de 10N quando a peça de carregamento entrou em contacto com o provete, sendo posteriormente a restante carga aplicada. A pré-carga aplicada permite que a estrutura do provete responda ao carregamento que está a ser imposto, ocorrendo um reajustamento das partículas no seu interior
- Registou-se a carga,  $F_r$ , que provocou a rotura do provete, sendo dividido em duas partes. Esta carga é obtida pelo software e representa a força que provocou a rotura.



a – máquina universal de tracção e software com o suporte de flexão; b – suporte para ensaio de flexão; c – provete prismático após o ensaio de flexão.

Figura 4.33 – Ensaio de resistência à flexão

b. Ensaio de resistência à compressão, figura 4.34

- Colocou-se na máquina universal de tracção o suporte próprio do ensaio de compressão e a peça de carregamento, ambos com uma superfície plana e de forma rectangular
- Colocou-se um dos topos dos provetes obtidos do ensaio de resistência à flexão dentro de uma cápsula, centrado. A face que ficou em contacto com o suporte, foi a da moldagem assegurando a área de contacto de  $1600\text{mm}^2$
- Aplicou-se a carga a uma velocidade de 5,25 mm/min. Esta foi iniciada por uma pré-carga de 20N quando a peça de carregamento entrou em contacto com o provete, sendo posteriormente a restante carga aplicada. A pré-carga aplicada permite que a estrutura do provete responda ao carregamento que está a ser imposto, ocorrendo um reajustamento das partículas no seu interior

- Registou-se a carga,  $F_c$ , que provocou a rotura do provete. A parte central do provete ficou desfeita, sobrando os topos. Esta carga é obtida pelo software e representa a força que provocou a rotura



a – colocação do provete no suporte para o ensaio à compressão ; b – máquina universal de tracção e software com o suporte de compressão; c – provete prismático durante o ensaio de compressão

Figura 4.34 – Ensaio de resistência à compressão

### iii) Resultados

Para a determinação dos valores das resistências mecânicas utilizaram-se as seguintes fórmulas:

- a. Resistência à tracção por flexão,  $R_f$ , [MPa]:

$$R_f = \frac{1,5 \times F_f \times l}{b^3} \quad (4.13)$$

sendo:  $F_f$  a carga aplicada que provoca a rotura por flexão [N];  $b$  o lado da secção quadrada do provete ( $b=4\text{mm}$ );  $l$  a distância entre apoios ( $l=100\text{mm}$ ).

- b. Resistência à compressão,  $R_c$ , [MPa]:

$$R_c = \frac{F_c}{A} \quad (4.14)$$

sendo:  $F_c$  a carga aplicada que provoca a rotura à compressão [N];  $A$  a área de contacto ( $A=40 \times 40 = 1600\text{mm}^2$ ).

As resistências à tracção por flexão e à compressão foram determinados segundo as fórmulas 4.13 e 4.14, respectivamente, os seus valores médios e desvios padrão são apresentados na tabela 4.12. Nas tabelas I.59 a I.63 do Anexo I estão indicados os valores de cada provete das cinco argamassas.

Tabela 4.12 – Resistências mecânicas médias e desvios padrão das argamassas ensaiadas

Argamassas	Provetes n°	Idades [dias]	$R_f$ [MPa]		$R_c$ [MPa]	
			Média	DP	Média	DP
<b>A0</b>	A0-1 a A0-3	90	0,2	0,13	0,9	0,03
	B0-1 a B0-3	111 <sup>(1)</sup>	-	-	0,9	0,04
	B0-4 a B0-6	111	0,4	0,04	1,0	0,08
<b>A1</b>	A1-1 a A1-3	90	0,7	0,11	1,1	0,44
	B1-1 a B1-3	111	-	-	1,2	0,28

Tabela 4.12 – Resistências mecânicas médias e desvios padrão das argamassas ensaiadas (continuação)

Argamassas	Provetes n°	Idades [dias]	$R_f$ [MPa]		$R_c$ [MPa]	
			Média	DP	Média	DP
<b>A1</b>	B1-4 a B1-6	111	0,6	0,04	1,3	0,29
	A2-1 a A2-3	90	0,8	0,2	1,3	0,11
<b>A2</b>	B2-1 a B2-3	111	-	-	1,5	0,16
	B2-4 a B2-6	111	0,8	0,06	1,7	0,31
<b>A3</b>	A3-1 a A3-3	90	0,5	0,09	0,9	0,03
	B3-1 a B3-3	111	-	-	1,2	0,05
	B3-4 a B3-6	111	0,6	0,07	1,2	0,22
<b>A4</b>	A4-1 a A4-3	90	0,8	0,02	0,9	0,21
	B4-1 a B4-3	111	-	-	1,7	0,43
	B4-4 a B4-6	111	0,8	0,04	1,4	0,09

<sup>(1)</sup> Provetes ensaiados após o contacto com a água.

### **Aderência ao suporte**

Aderência ao suporte (ou ensaio de arrancamento) é uma propriedade importante nas argamassas de revestimentos, quer ao nível de segurança para os utilizadores, quer na durabilidade dos edifícios. A ligação entre uma argamassa e um suporte poroso depende como os diferentes constituintes se relacionam e o modo como uma argamassa é aplicada (Gaspar, 2011).

Este ensaio permite obter a força necessária para provocar o arrancamento por tracção de uma área da argamassa aplicada num suporte (Faria, 2004).

Para a elaboração deste ensaio experimental seguiu-se a metodologia da ficha Fe 21 UNL/DEC (UNL/DEC 1996g).

#### **i) Equipamentos e utensílios**

- Pastilhas quadradas (50mm×50mm) e altura de 10mm, com um sistema de rosca numa das faces
- Cola de alta resistência (resina epóxida)
- Dispositivo de furar, com uma broca circular de 50mm de diâmetro interior (rebarbadora)
- Dinamómetro (aparelho adequado para ensaios de arrancamento)
- Régua graduada
- Craveira

#### **ii) Procedimento experimental, figura 4.35**

- Fizeram-se três incisões (em cada tijolo) nas argamassas com o dispositivo de furar, de modo, a que sejam cortadas em toda a sua espessura
- Colaram-se as pastilhas metálicas nas zonas delimitadas pelas incisões
- Deixou-se secar a cola durante 48 horas

- Aplicou-se o dinamómetro sobre cada uma das pastilhas, verificou-se o zero no manómetro, rodou-se o manípulo do dinamómetro até ocorrer a rotura do plano de contacto da argamassa com o tijolo
- Registou-se o valor da força máxima exercida e avaliou-se o tipo de rotura
- Mediu-se com um auxílio de uma craveira os lados de cada pastilha com a argamassa



a – marcação das pastilhas no tijolo; b, c – incisão com o auxílio de uma rebarbadora; d – colocação da cola na parte inferior da pastilha; e – colocação da pastilha na argamassa do tijolo; f – aplicação do dinamómetro sobre a pastilha; g – medição do lado da pastilha.

Figura 4.35 – Ensaio de aderência

### iii) Resultados

A tensão de aderência,  $\sigma_a$ , [MPa] para cada pastilha cilíndrica é determinada pela seguinte fórmula (UNL/DEC,1996):

$$\sigma_a = \frac{F}{S} \quad (4.15)$$

sendo: F a força de rotura [N]; S a área das pastilhas ( $S=25^2 \times \pi = 1963 \text{ mm}^2$ ).

Neste ensaio, utilizaram-se pastilhas quadradas com o objectivo de facilitar a execução das incisões nas argamassas. No entanto, como dinamómetro está programado para o uso de pastilhas circulares, foi necessário a conversão da área das pastilhas circulares para quadradas. Assim sendo, recorreu-se à expressão:

$$\sigma_a = \frac{F}{A_{\circ}} \times \frac{A_{\circ}}{A_{\square}} \quad (4.16)$$

sendo:  $\sigma_a$  a tensão de cedência das pastilhas quadradas [Mpa]; F a força de rotura [N];  $A_{\circ}$  a área da pastilha circular ( $A=1963 \text{ mm}^2$ );  $A_{\square}$  a área da pastilha quadrada ( $A=50 \times 50 \text{ mm}^2$ ).



Na tabela 4.13 apresentam-se os valores médios da tensão de aderência e os respectivos desvios padrão. Os valores individuais estão indicados na tabela I.64 do anexo.

Tabela 4.13 – Tensões médias de aderência e desvios padrão das argamassas ensaiadas

Argamassas	Idades [dias]	Provetes	$\sigma_a^{med}$ [MPa]	
			Média	DP
A0	100	A <sub>d</sub> 0-1	0,21	0,020
		A <sub>d</sub> 0-2		
		A <sub>d</sub> 0-3		
A1		A <sub>d</sub> 1-1	0,18	0,007
		A <sub>d</sub> 1-2		
		A <sub>d</sub> 1-3		
A2		A <sub>d</sub> 2-1	0,16	0,007
		A <sub>d</sub> 2-2		
		A <sub>d</sub> 2-3		
A3		A <sub>d</sub> 3-1	0,19	0,001
		A <sub>d</sub> 3-2		
		A <sub>d</sub> 3-3		
A4		A <sub>d</sub> 4-1	0,16	0,015
		A <sub>d</sub> 4-2		
		A <sub>d</sub> 4-3		

O tipo de rotura é avaliado segundo o seguinte critério: aderência (plano de ligação revestimento-suporte); no seio do revestimento; no seio do suporte e mista (UNL/DEC, 1996). Na figura 4.36, observam-se os provetes após aplicação da tensão máxima e a correspondente classificação do tipo de rotura é apresentada na tabela 4.14.

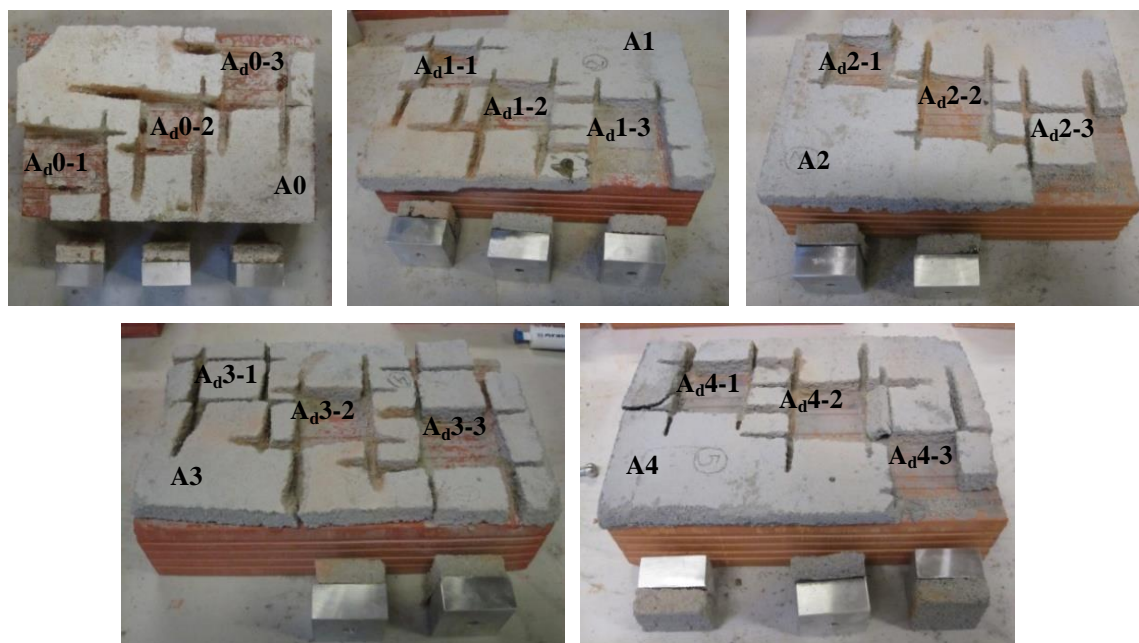


Figura 4.36 – Provetes depois da aplicação da tensão máxima

Tabela 4.14 – Tipologia de rotura dos provetes estudados

Argamassas	Provetes	Tipologia de rotura
<b>A0</b>	A <sub>d</sub> 0-1	Aderência
	A <sub>d</sub> 0-2	Aderência
	A <sub>d</sub> 0-3	Aderência
<b>A1</b>	A <sub>d</sub> 1-1	Seio do revestimento
	A <sub>d</sub> 1-2	Seio do revestimento
	A <sub>d</sub> 1-3	Seio do revestimento
<b>A2</b>	A <sub>d</sub> 2-1	Aderência
	A <sub>d</sub> 2-2	Aderência
	A <sub>d</sub> 2-3	(1)
<b>A3</b>	A <sub>d</sub> 3-1	(1)
	A <sub>d</sub> 3-2	Seio do revestimento
	A <sub>d</sub> 3-3	Seio do revestimento
<b>A4</b>	A <sub>d</sub> 4-1	Seio do revestimento
	A <sub>d</sub> 4-2	Seio do revestimento
	A <sub>d</sub> 4-3	Seio do revestimento

(1) Ensaio não realizado em virtude do descolamento do revestimento aquando da preparação (corte) dos provetes. Rotura por aderência: na ligação entre o revestimento e o suporte.

#### 4.6. Síntese dos resultados dos ensaios realizados

Nas tabelas 4.15, 4.16 e 4.17, apresenta-se o resumo dos valores médios e dos desvios padrão obtidos nos ensaios experimentais realizados no presente capítulo.

Tabela 4.15 – Resultados das características físicas dos materiais

Materiais	Características físicas			
	Módulo de finura [-]	Máxima dimensão do agregado [mm]	Mínima dimensão do agregado [mm]	Ba [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>Areia normalizada</b>	1,19	0,075	3,36	1627,0
<b>Cal aérea</b>	-	-	-	294,8
<b>Cinzas volantes não conformes</b>	-	-	-	949,8
<b>Cinzas volantes conformes</b>	-	-	-	772,6

Tabela 4.16 – Resultados das características físicas dos provetes

Provetes	Características físicas														
	ε [mm/m]	Cc [kg/m <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> ]		VA [kg/m <sup>2</sup> ]		IS [-]		TS [kg/m <sup>2</sup> .h]		MVR [kg/m <sup>3</sup> ]		MVA [kg/m <sup>3</sup> ]		PA [%]	
	Ind.	Méd.	DP	Méd.	DP	Méd.	DP	Méd.	DP	Ind.	DP	Ind.	DP	Ind.	DP
A0-1	0,69														
A0-2	0,69	12,02	2,45	16,38	1,45	0,28	0,014	1,04	0,067	2400,4	88,7	1880,2	66,9	21,7	00,3
A0-3	0,63														
A0-4	0,06														
A0-5	0,06	14,12	0,29	28,00	0,34	0,29	0,021	1,08	0,005	-	-	-	-	-	-
A0-6	0,06														

Tabela 4.16 – Resultados das características físicas dos provetes (continuação)

Provetes	Características físicas														
	$\varepsilon$ [mm/m]	Cc [kg/m <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> ]		VA [kg/m <sup>2</sup> ]		IS [-]		TS [kg/m <sup>2</sup> .h]		MVR [kg/m <sup>3</sup> ]		MVA [kg/m <sup>3</sup> ]		PA [%]	
	Ind.	Méd.	DP	Méd.	DP	Méd.	DP	Méd.	DP	Ind.	DP	Ind.	DP	Ind.	DP
A1-1	1,25														
A1-2	0,69	9,65	0,28	13,13	0,60	0,31	0,013	0,79	0,035	2429,7	1,7	1956,8	8,2	19,5	0,4
A1-3	1,25														
A1-4	0,13														
A1-5	0,06	8,90	0,39	25,72	0,05	0,29	0,034	0,94	0,111	-	-	-	-	-	-
A1-6	0,63														
A2-1	0,69														
A2-2	1,25	10,17	0,28	13,46	0,43	0,25	0,026	0,56	0,166	2416,9	9,3	1975,1	6,6	18,3	0,3
A2-3	1,25														
A2-4	0,69														
A2-5	0,00	9,24	0,29	25,33	0,05	0,30	0,071	0,82	0,151	-	-	-	-	-	-
A2-6	0,69														
A3-1	0,13														
A3-2	0,69	11,97	0,86	16,48	2,00	0,37	0,047	1,09	0,731	2415,3	21,0	2072,9	235,5	14,1	10,2
A3-3	0,63														
A3-4	0,06														
A3-5	0,13	12,59	0,6	27,92	0,20	0,43	0,059	0,70	0,096	-	-	-	-	-	-
A3-6	0,06														
A4-1	0,63														
A4-2	0,63	8,79	0,29	14,96	2,14	0,35	0,050	0,82	0,150	2454,1	11,8	1957,5	17,4	20,2	1,0
A4-3	0,63														
A4-4	0,00														
A4-5	0,06	9,34	0,27	26,82	0,27	0,38	0,033	0,70	0,099	-	-	-	-	-	-
A4-5	0,06														

Tabela 4.17 – Resultados das características mecânicas dos provetes

Provetes	Características mecânicas							
	E <sub>d</sub> [MPa]		R <sub>f</sub> [MPa]		R <sub>c</sub> [MPa]		A <sub>d</sub> [MPa]	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
A0	-	-	-	-	-	-	0,21	0,02
A0-1 a A0-3	3318,3	2903,3	0,2	0,13	0,9	0,03	-	-
B0-1 a B0-3	-	-	-	-	0,9	0,04	-	-
B0-4 a B0-6	5639,8	80,0	0,4	0,04	1,0	0,08	-	-
A1	-	-	-	-	-	-	0,18	0,007
A1-1 a A1-3	7405,0	175,1	0,7	0,11	1,1	0,44	-	-
B1-1 a B1-3	-	-	-	-	1,2	0,28	-	-
B1-4 a B1-6	7726,7	349,8	0,6	0,04	1,3	0,29	-	-
A2	-	-	-	-	-	-	0,16	0,007
A2-1 a A2-3	8056,0	432,5	0,8	0,2	1,3	0,11	-	-
B2-1 a B2-3	-	-	-	-	1,5	0,16	-	-
B2-4 a B2-6	9509,4	26,9	0,8	0,06	1,7	0,31	-	-
A3	-	-	-	-	-	-	0,19	0,001
A3-1 a A3-3	5594,9	342,0	0,5	0,09	0,9	0,03	-	-
B3-1 a B3-3	-	-	-	-	1,2	0,05	-	-
B3-4 a B3-6	7363,8	151,5	0,6	0,07	1,2	0,22	-	-
A4	-	-	-	-	-	-	0,16	0,015
A4-1 a A4-3	7416,1	176,4	0,8	0,02	0,9	0,21	-	-
B4-1 a B4-3	-	-	-	-	1,7	0,43	-	-
B4-4 a B4-6	8130,6	291,6	0,8	0,04	1,4	0,09	-	-



## Capítulo 5

### ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

#### 5.1. Considerações iniciais

No presente capítulo efectua-se uma análise dos resultados (valores médios e desvios padrão) obtidos na campanha experimental apresentada no Capítulo 4. Esta análise está organizada em duas fases: na primeira, recuperam-se os principais resultados com vista à interpretação individual de cada característica (física e mecânica) e ao cruzamento de diferentes características; na segunda, comparam-se os resultados obtidos no presente estudo com os resultados de outros autores mencionados no Capítulo 3, permitindo assim justificar características e comportamentos das argamassas.

Na primeira fase da análise, sempre que necessário, considerou-se dois tipos de referência: (i) a argamassa de referência (A0) serve de comparação às cinzas volantes conformes e não conformes; (ii) as argamassas de cinzas volantes conformes funcionam como referência às argamassas com cinzas volantes não conformes. Assim sendo, cada gráfico está organizado segundo três partes:

- 1ª parte (fundo verde) relaciona a argamassa de referência (A0, barras amarelas) com as duas argamassas de cinzas volantes conformes (A1 e A2) de diferentes percentagens
- 2ª parte (fundo rosa) relaciona a argamassa de referência (A0, barras amarelas) com as duas argamassas de cinzas volantes não conformes (A3 e A4) de diferentes percentagens
- 3ª parte (barras azuis e vermelhas) compara as argamassas com as mesmas percentagens de cinzas volantes conformes (A1 e A3, barras azuis) e não conformes (A2 e A4, barras vermelhas)

#### 5.2. Caracterização das argamassas no estado endurecido

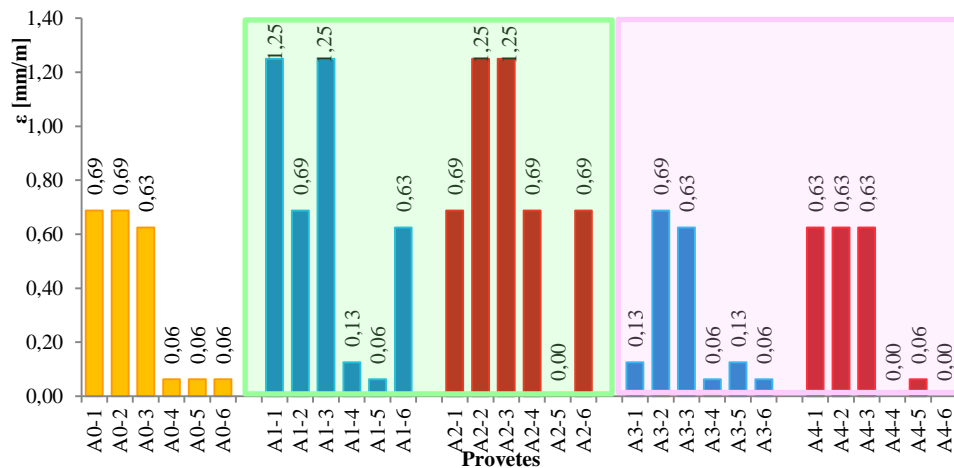
O estudo da caracterização física e mecânica das argamassas produzidas é efectuado segundo dois tipos de análise: individual e conjunta.

### 5.2.1. Análise dos valores individuais

Esta análise permite avaliar a evolução das características físicas e mecânicas nas cinco argamassas (A0 a A4)

#### Características físicas

Na figura 5.1 representam-se os valores finais de retracção (por estimativa) dos 30 provetes antes da desmoldagem.



Argamassas	Provetes	Composição ponderal
A0	A0-1a A0-6	1 : 3 Ca : AN
A1	A1-1a A1-6	1 : 0,2 : 3,6 Ca : CVC : AN
A2	A2-1a A2-6	1 : 0,5 : 4,5 Ca : CVC : AN
A3	A3-1a A3-6	1 : 0,2 : 3,6 Ca : CVNC : AN
A4	A4-1a A4-6	1 : 0,5 : 4,5 Ca : CVNC : AN

Ca – cal aérea; CVC – cinzas volantes conformes; CVNC – cinzas volantes não conformes; AN – areia normalizada

Figura 5.1 – Retracção dos provetes ensaiados

#### 1ª Parte (fundo verde):

- Os provetes com cinzas volantes conformes (A1 e A2), independentemente da sua percentagem, têm valores superiores de retracção em comparação com os provetes constituídos apenas por cal aérea (argamassa de referência). Sabe-se que as argamassas apenas com cal aérea no processo de endurecimento/cura (reacção de carbonatação) não necessitam de água para endurecer, ao contrário do que acontece quando as argamassas são também constituídas por cinzas volantes. Neste caso, o processo de endurecimento também ocorre por hidratação, pois as cinzas volantes são constituídas por alumina e sílica que na presença da água reagem e transformam-se em aluminatos e silicatos de cálcio, respectivamente.

#### 2ª Parte (fundo rosa):

- A retracção dos provetes com cinzas volantes não conformes (A3 e A4), com diferentes teores de cinzas, é da mesma ordem de grandeza dos provetes da argamassa de referência

(A0). Este comportamento pode justificar-se pelo facto das cinzas volantes não conformes desempenharem também uma função de enchimento (filer), quase inerte, substituindo parcialmente as reacções de hidratação.

3ª Parte (cinzas volantes conformes e não conformes – barras azuis e vermelhas):

- Os provetes com cinzas volantes conformes (A1 e A2) têm, em geral, valores superiores de retracção em relação aos provetes com cinzas volantes não conformes (A3 e A4). Para um mesmo volume de cinzas volantes conformes e não conformes (1/6 e 2/6), o volume das não conformes também tem teores de inqueimados (carbono livre). Assim sendo, os provetes A1 e A2 têm maior quantidade de cinzas volantes, portanto têm mais sílica e alumina, necessitando, por isso, mais água para as suas reacções de hidratação.

Na figura 5.2 representam-se os resultados médios e os desvios padrão do coeficiente de capilaridade dos “meios provetes” (Ai-1 a Ai-3) e dos provetes inteiros (Ai-4 a Ai-6).

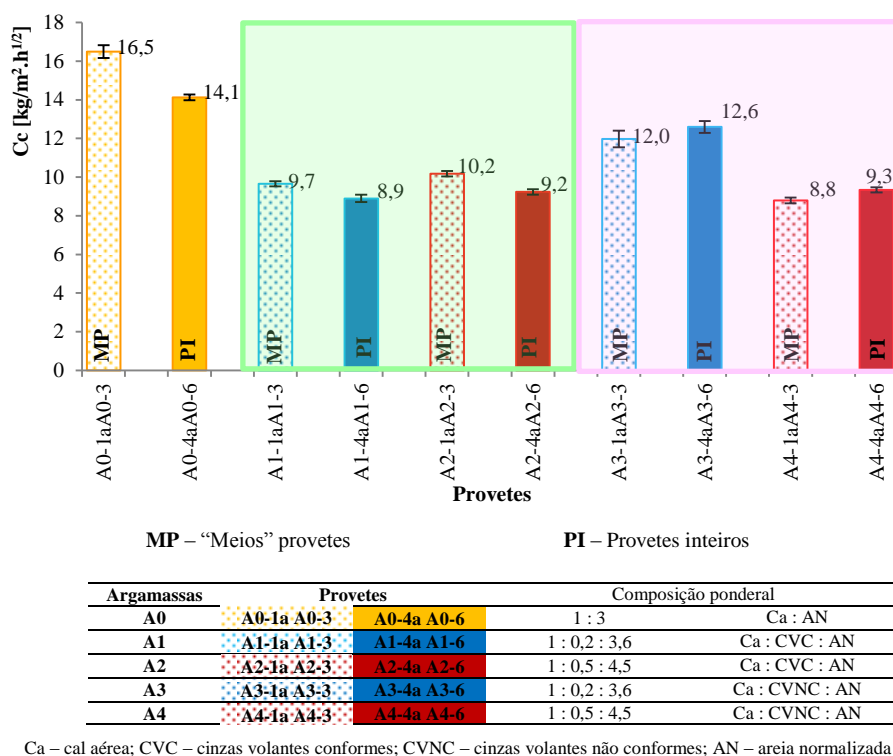


Figura 5.2 – Coeficiente de capilaridade dos provetes ensaiados

1ª Parte (fundo verde):

- Nos “meios provetes” e nos provetes inteiros o valor do coeficiente de capilaridade (Cc) diminui com a adição de cinzas volantes conformes em relação aos provetes de argamassa de referência (A0); daqui se infere que as cinzas volantes conformes, independentemente da sua percentagem, propiciam uma absorção lenta.

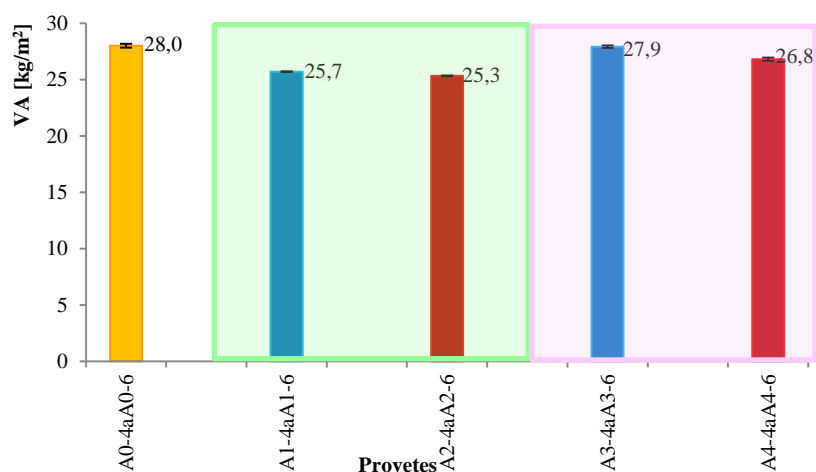
## 2ª Parte (fundo rosa):

- Nos “meios provetes”, o valor de Cc manteve-se com a adição da menor percentagem de cinzas volantes não conformes e diminuiu com a percentagem mais alta do mesmo tipo de cinzas volantes quando comparado aos provetes de argamassa de referência.
- Nos provetes inteiros, o valor de Cc diminuiu com a adição de cinzas volantes não conformes em relação aos provetes da argamassa de referência.
- Em termos gerais, a adição de cinzas volantes não conformes, independentemente da sua percentagem, propicia uma lenta absorção de água; o que constitui um facto positivo.

## 3ª Parte (cinzas volantes conformes e não conformes – barras azuis e vermelhas):

- Para o teor mais baixo de cinzas volantes conformes e não conformes (barras azuis), o valor de Cc é maior nas argamassas com cinzas volantes não conformes (A1/A3) tanto nos “meios provetes” como nos provetes inteiros, ou seja, as argamassas com cinzas volantes não conformes absorvem de forma mais rápida.
- Para a maior percentagem (barras vermelhas) de cinzas volantes (conformes e não conformes), o valor de Cc é maior nos “meios provetes” com cinzas volantes conformes. Por oposição, o valor de Cc manteve-se nos provetes inteiros.

Em suma, constata-se que os valores do Cc têm a mesma evolução tanto nos “meios provetes” como nos provetes inteiros; conclui-se assim que a velocidade de absorção de água nas argamassas não é influenciada pela dimensão do provete, como era espectável que acontecesse. Na figura 5.3 apresentam-se os resultados médios e os desvios padrão do valor assintótico dos provetes inteiros (Ai-4 a Ai-6).



Argamassas	Provetes	Composição ponderal	
A0	A0-4a A0-6	1 : 3	Ca : AN
A1	A1-4a A1-6	1 : 0,2 : 3,6	Ca : CVC : AN
A2	A2-4a A2-6	1 : 0,5 : 4,5	Ca : CVC : AN
A3	A3-4a A3-6	1 : 0,2 : 3,6	Ca : CVNC : AN
A4	A4-4a A4-6	1 : 0,5 : 4,5	Ca : CVNC : AN

Ca – cal aérea; CVC – cinzas volantes conformes; CVNC – cinzas volantes não conformes; AN – areia normalizada

Figura 5.3 – Valor assintótico dos provetes ensaiados



1ª Parte (fundo verde) e 2ª Parte (fundo rosa):

A análise é selhamente logo é apresentada em conjunto.

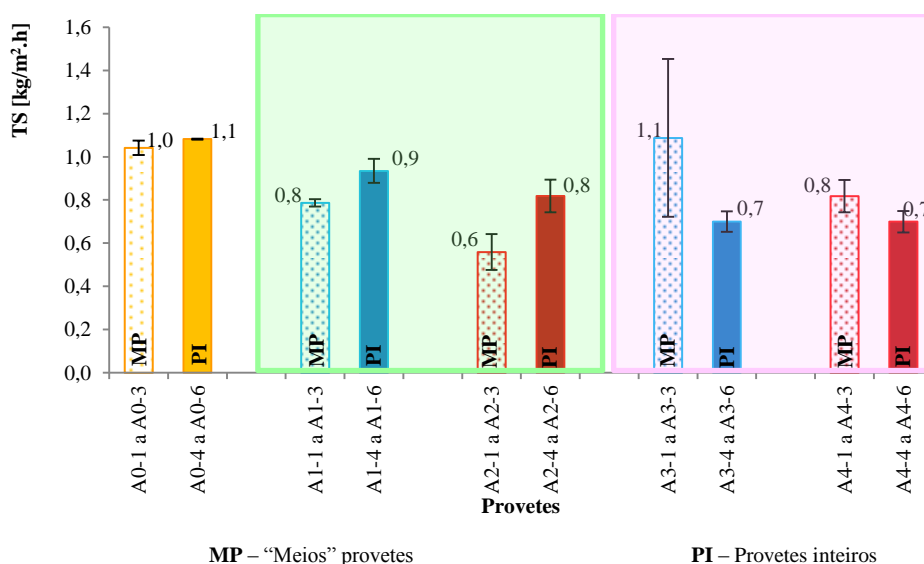
- O valor assimpótico (VA) dos provetes com cinzas volantes conformes (A1 e A2) e não conformes (A3 e A4) é menor relativamente aos provetes da argmassa de referência (A0), isto significa que as argmassas com cinzas volantes, indepentemente do seu tipo absorvem menos água do que uma argmassa sem cinzas volantes.

3ª Parte (cinzas volantes conformes e não conformes – barras azuis e vermelhas):

- Os valores de VA das argmassas com cinzas volantes não conformes (A3 e A4) são ligeiramente superiores aos provetes com cinzas conformes (A1 e A2), ou seja, absorvem mais água.

O valor assimpótico (VA) e o coeficiente de capilaridade (Cc) das argmassas tipo Ai-4 a Ai-6 (provetes inteiros) apresentam a mesma evolução. À medida que se adiciona cinzas volantes conformes (A1 e A2) ou não conformes (A3 e A4), comparando com a argmassa de referência (A0), verifica-se que VA e Cc diminuem, ou seja, absorvem menos água e de forma mais lenta. Em relação às argmassas com cinzas volantes conformes e não conformes, constata-se que os valores VA e Cc são superiores nas argmassas com cinzas volantes não conformes, isto é, absorvem mais água e mais rapidamente.

Na figura 5.4 referem-se os valores médios e os desvios padrão da taxa de secagem dos “meios provetes” (Ai-1 a Ai-3) e dos provetes inteiros (Ai-4 a Ai-6).



Argmassas	Provetes	Composição ponderal	
A0	A0-1a A0-3    A0-4a A0-6	1 : 3	Ca : AN
A1	A1-1a A1-3    A1-4a A1-6	1 : 0,2 : 3,6	Ca : CVC : AN
A2	A2-1a A2-3    A2-4a A2-6	1 : 0,5 : 4,5	Ca : CVC : AN
A3	A3-1a A3-3    A3-4a A3-6	1 : 0,2 : 3,6	Ca : CVNC : AN
A4	A4-1a A4-3    A4-4a A4-6	1 : 0,5 : 4,5	Ca : CVNC : AN

Ca – cal aérea; CVC – cinzas volantes conformes; CVNC – cinzas volantes não conformes; AN – areia normalizada

Figura 5.4 – Taxa de secagem dos provetes ensaiados

### 1ª Parte (fundo verde)

- Nos “meios provetes” e nos provetes inteiros, o valor da taxa de secagem (TS) diminui à medida que ocorreu um acréscimo de cinzas volantes conformes em comparação com os provetes de argamassa de referência (A0), isto significa que a velocidade inicial de secagem é mais lenta.

### 2ª Parte (fundo rosa)

- O valor de TS dos “meios provetes” com a percentagem mais baixa de cinzas volantes não conformes (A3) aumentou ligeiramente em comparação com os “meios provetes” de argamassa de referência. Contudo, este aumento deve ser desprezado, uma vez que, a argamassa A3 tem uma grande dispersão no desvio padrão. No caso dos “meios provetes” com a percentagem mais elevada de cinzas não conformes (A4), o valor de TS diminui em relação aos “meios provetes” de argamassa de referência, isto é, reduziu a velocidade inicial de secagem (mais lenta).
- Nos provetes inteiros, o valor de TS diminui com o acréscimo de cinzas não conformes comparando com os provetes inteiros da argamassa de referência, donde se conclui que as cinzas volantes não conformes prejudicam a velocidade inicial de secagem.

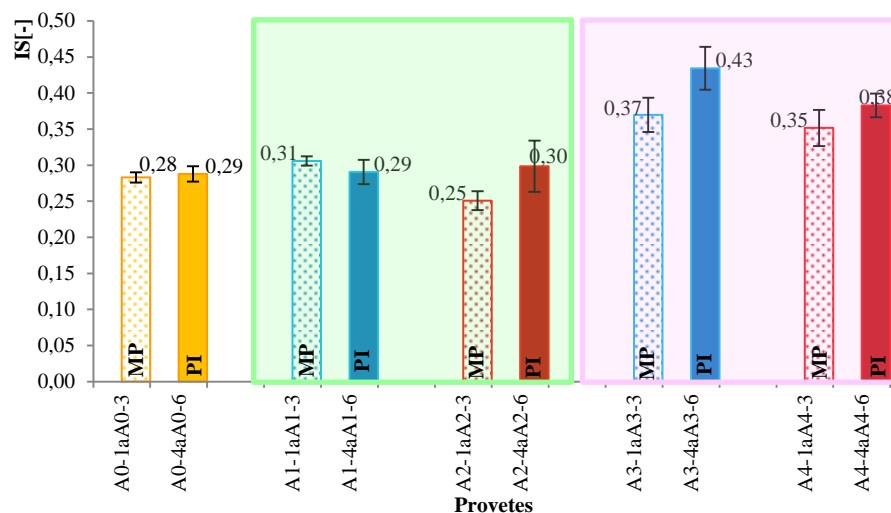
### 3ª Parte (cinzas volantes conformes e não conformes – barras azuis e vermelhas):

- Nos “meios provetes” e nos provetes inteiros, os valores de TS são irregulares independentemente do teor e do tipo de cinzas volantes (conformes ou não conformes).

Resumindo, a adição de cinzas volantes conformes ou não conformes às argamassas de cal aérea prejudica a velocidade inicial de secagem, isto é, as argamassas secam de forma mais lenta.

O valor do índice de secagem (IS) e da taxa de secagem (TS), em termos gerais, têm evoluções diferentes (incluindo “meios provetes” e provetes inteiros). Todavia, os provetes com cinzas volantes não conformes (A3 e A4) têm valores de IS e TS inferiores em relação à argamassa de referência e às argamassas com cinzas volantes conformes, o que significa secagem de forma lenta e têm dificuldade em secar.

Na figura 5.5 representam-se os resultados médios e os desvios padrão do índice de secagem dos “meios provetes” (Ai-1 a Ai-3) e dos provetes inteiros (Ai-4 a Ai-6).



MP – “Meios” provetes

PI – Provetes inteiros

Argamassas	Provetes		Composição ponderal	
A0	A0-1a A0-3	A0-4a A0-6	1 : 3	Ca : AN
A1	A1-1a A1-3	A1-4a A1-6	1 : 0,2 : 3,6	Ca : CVC : AN
A2	A2-1a A2-3	A2-4a A2-6	1 : 0,5 : 4,5	Ca : CVC : AN
A3	A3-1a A3-3	A3-4a A3-6	1 : 0,2 : 3,6	Ca : CVNC : AN
A4	A4-1a A4-3	A4-4a A4-6	1 : 0,5 : 4,5	Ca : CVNC : AN

Ca – cal aérea; CVC – cinzas volantes conformes; CVNC – cinzas volantes não conformes; AN – areia normalizada

Figura 5.5 – Índice de secagem dos provetes ensaiados

#### 1ª Parte (fundo verde)

- O valor do índice de secagem (IS) tem um comportamento distinto quando se compara os “meios provetes” de diferentes teores de cinzas volantes conformes (A1 e A2) com os “meios provetes” de argamassa de referência (A0).
- Nos “meios provetes”, o valor de IS aumenta com o menor teor de cinza volante conforme (A0/A1) e diminui com o maior teor de cinza volante conforme (A0/A2); daqui se infere, que a maior percentagem de cinza volante conforme facilita a secagem da argamassa.
- Nos provetes inteiros, quando se compara as argamassas com a menor percentagem de cinza volante conforme (A1) com a argamassa de referência (A0), o valor de IS não sofre alteração. Porém, as argamassas com a maior percentagem de cinza volante conforme (A2) propiciam um aumento no valor de IS em relação à argamassa de referência.
- De acordo com o valor IS, os “meios provetes” com a percentagem mais baixa de cinzas conformes têm maior facilidade de evaporação.

#### 2ª Parte (fundo rosa)

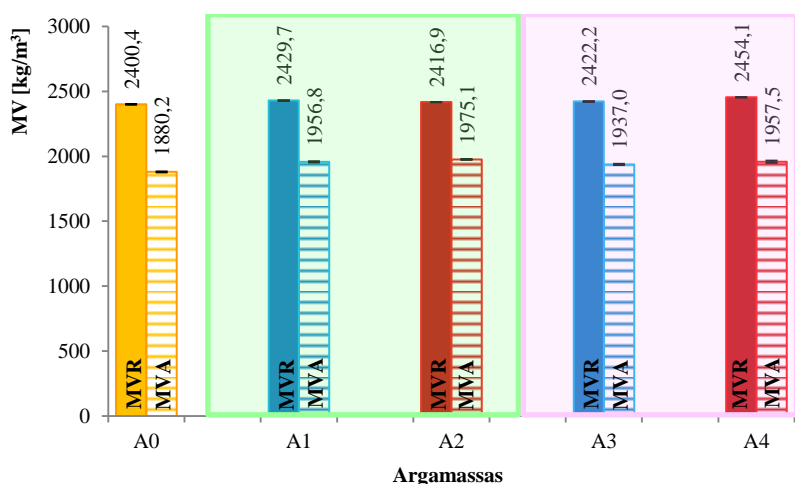
- Nos “meios provetes” e nos provetes inteiros com adição de cinzas volantes não conformes o valor de IS aumentou em relação aos provetes de argamassa de referência.
- Segundo o valor IS, os provetes inteiros com a percentagem mais baixa de cinzas não conformes secam com maior facilidade.

### 3ª Parte (cinzas volantes conformes e não conformes – barras azuis e vermelhas):

- Nos “meios provetes” e nos provetes inteiros, o valor de IS é superior nas argamassas com cinzas volantes não conformes, independentemente do seu teor, relativamente às argamassas com cinzas volantes conformes. Assim sendo, as argamassas com cinzas volantes não conformes têm maior dificuldade em secar.

Em suma, os valores de IS nos “meios provetes” e nos provetes inteiros têm o mesmo desenvolvimento excepto na comparação entre as argamassas com cinzas volantes conformes e a argamassa de referência; conclui-se assim que a continuidade de secagem das argamassas com cinzas volantes não conformes não depende da dimensão do provete.

Na figura 5.6 encontram-se os valores médios e os desvios padrão das massas volúmicas (aparente e real) que foram obtidas pelo método hidrostático.



MVR – massa volúmica real      MVA – massa volúmica aparente

Argamassas	Composição ponderal	
A0	1 : 3	Ca : AN
A1	1 : 0,2 : 3,6	Ca : CVC : AN
A2	1 : 0,5 : 4,5	Ca : CVC : AN
A3	1 : 0,2 : 3,6	Ca : CVNC : AN
A4	1 : 0,5 : 4,5	Ca : CVNC : AN

Ca – cal aérea; CVC – cinzas volantes conformes; CVNC – cinzas volantes não conformes; AN – areia normalizada

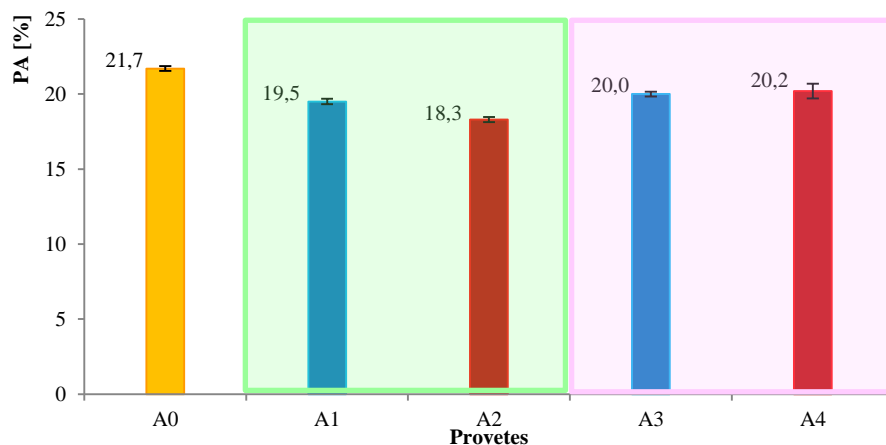
Figura 5.6 – Massas volúmicas reais e aparentes das argamassas ensaiadas

A evolução das massas volúmicas é a mesma em todas as argamassas. Nesse sentido, optou-se por fazer uma análise em simultâneo.

- Os resultados da massa volúmica real (MVR) das argamassas A1 e A2 com diferentes teores de cinzas volantes conformes (fundo verde) e das argamassas A3 e A4 com percentagens distintas de cinzas volantes não conformes (fundo rosa) têm a mesma ordem de grandeza da argamassa de referência (A0), o mesmo acontece com a massa volúmica aparente.

- É de salientar que MVA em todas as argamassas tem um valor inferior ao MVR, como era espectável, uma vez que, MVA contabiliza o volume todo, incluindo os poros, tornando por isso o material mais leve.

Na figura 5.7 representam-se os resultados da média e dos desvios padrão da porosidade aberta das cinco argamassas.



Argamassas	Composição ponderal
A0	1 : 3 Ca : AN
A1	1 : 0,2 : 3,6 Ca : CVC : AN
A2	1 : 0,5 : 4,5 Ca : CVC : AN
A3	1 : 0,2 : 3,6 Ca : CVNC : AN
A4	1 : 0,5 : 4,5 Ca : CVNC : AN

Ca – cal aérea; CVC – cinzas volantes conformes; CVNC – cinzas volantes não conformes; AN – areia normalizada

Figura 5.7 – Porosidade aberta das argamassas ensaiadas

#### 1ª Parte (fundo verde)

- O valor da porosidade aberta (PA) diminui com adição de cinzas volantes conformes em comparação com a argamassa de referência A0.

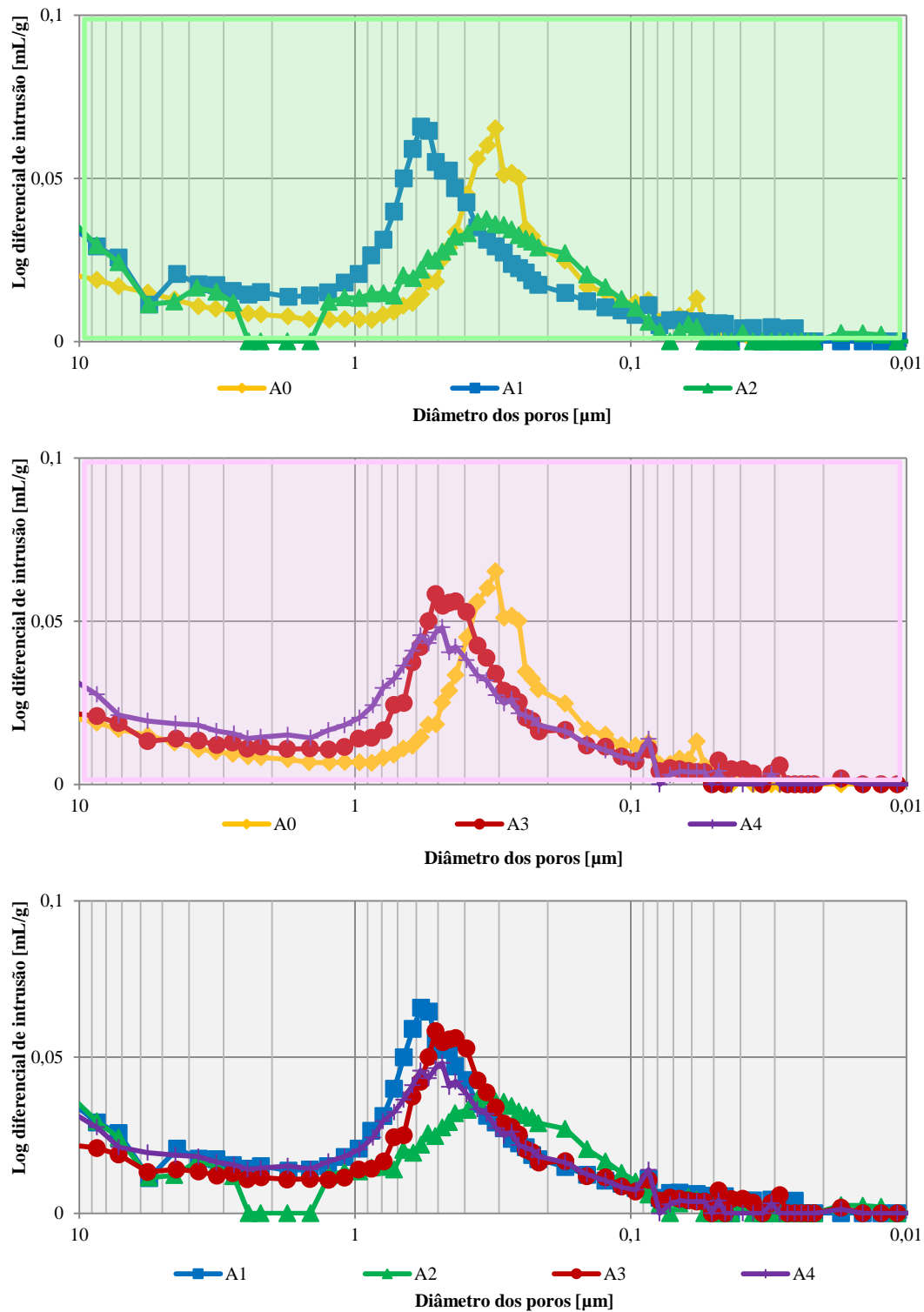
#### 2ª Parte (fundo rosa)

- O valor de PA das argamassas com cinzas não conformes, independentemente do seu teor, é inferior ao da argamassa A0 (referência). Contudo, o valor de PA manteve-se nas argamassas com cinzas não conformes.

#### 3ª Parte (cinzas volantes conformes e não conformes – barras azuis e vermelhas):

- Os valores de PA das argamassas com cinzas volantes não conformes são superiores relativamente às argamassas com cinzas conformes, independentemente da sua percentagem.

A figura 5.8 representa-se a evolução da distribuição dos poros nas cinco argamassas (A0 a A4).



Argamassas	Composição ponderal	
A0	1 : 3	Ca : AN
A1	1 : 0,2 : 3,6	Ca : CVC : AN
A2	1 : 0,5 : 4,5	Ca : CVC : AN
A3	1 : 0,2 : 3,6	Ca : CVNC : AN
A4	1 : 0,5 : 4,5	Ca : CVNC : AN

Ca – cal aérea; CVC – cinzas volantes conformes; CVNC – cinzas volantes não conformes; AN – areia normalizada

Figura 5.8 – Distribuição dos poros das argamassas ensaiadas

Na figura observa-se que a maior quantidade de poros das argamassas A0 a A4 situa-se nos tamanhos entre 0,1  $\mu\text{m}$  e 1  $\mu\text{m}$ , sendo este o intervalo utilizado para as comparações seguintes.

1ª Parte (fundo verde)

- A argamassa de referência (A0) apresenta uma maior quantidade de poros de pequenas dimensões, por oposição à argamassa com a menor percentagem de cinzas volantes conformes (A1) que tem poros de maiores dimensões.
- A argamassa com a maior percentagem de cinzas volantes conformes (A2) apresenta a mesma concentração de poros (o pico) mas em menor quantidade do que a argamassa referência (A0).

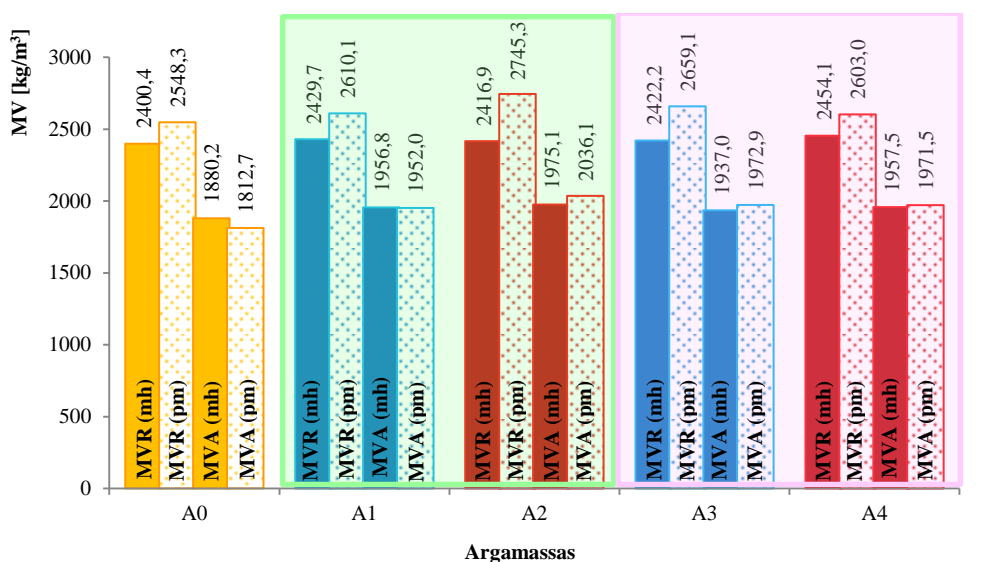
2ª Parte (fundo rosa)

- As argamassas com cinzas volantes não conformes (A3 e A4) apresentam uma distribuição de poros muito semelhante.
- As argamassas com cinzas volantes não conformes (A3 e A4) comparando com a argamassa de referência têm diâmetros maiores.

3ª Parte (cinzas volantes conformes e não conformes):

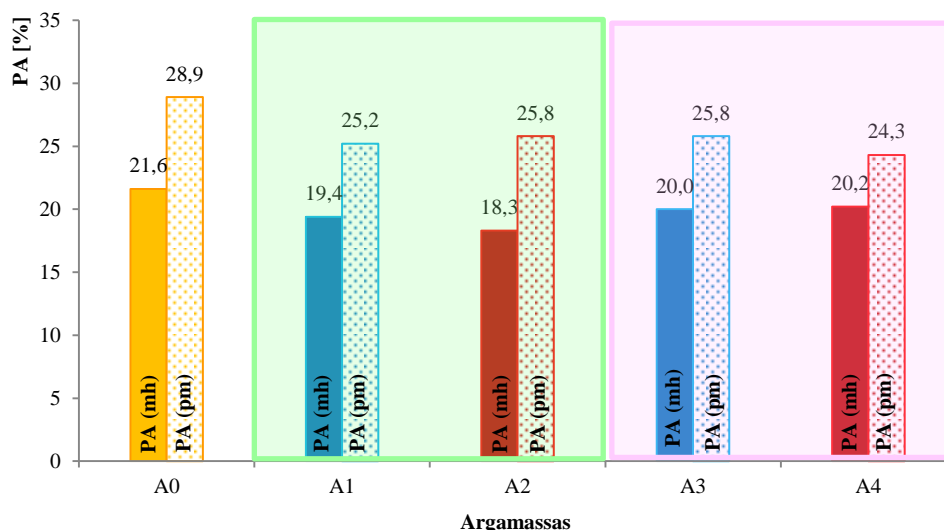
- Os diâmetros das argamassas com cinzas volantes não conformes (A3 e A4) situam-se entre os diâmetros das argamassas com cinzas volantes conformes (A1 e A2).

Na figura 5.9 apresentam-se os valores médios das massas volúmicas (reais e aparentes) obtidos pelo método hidrostático (mh) e pelo ensaio de porosimetria de mercúrio (pm).



MVR – massa volúmica real  
mh – método hidrostático

MVA – massa volúmica aparente  
pm – porosimetria de mercúrio



PA – porosidade aberta

mh – método hidrostático

pm – porosimetria de mercúrio

Argamassas	Composição ponderal	
A0	1 : 3	Ca : AN
A1	1 : 0,2 : 3,6	Ca : CVC : AN
A2	1 : 0,5 : 4,5	Ca : CVC : AN
A3	1 : 0,2 : 3,6	Ca : CVNC : AN
A4	1 : 0,5 : 4,5	Ca : CVNC : AN

Ca – cal aérea; CVC – cinzas volantes conformes; CVNC – cinzas volantes não conformes; AN – areia normalizada

Figura 5.9 – Comparação das massas volúmicas e da porosidade aberta entre o método hidrostático e porosimetria de mercúrio

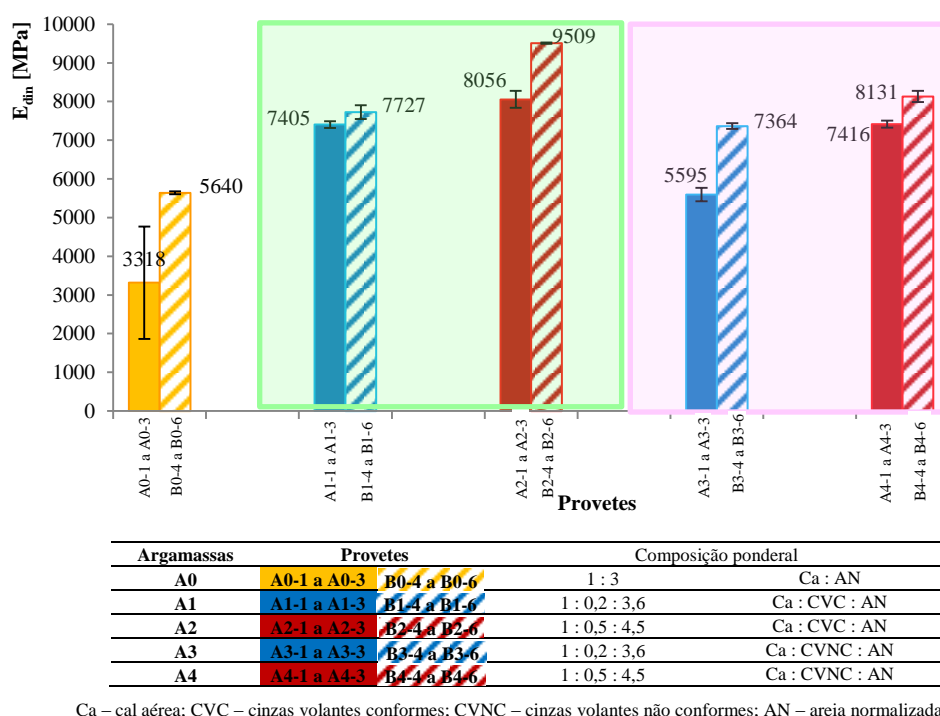
Observando a figura verifica-se que, em termos gerais, os valores obtidos por intrusão de mercúrio são ligeiramente superiores aos obtidos por método hidrostático (à exceção da argamassa A0). Posto isto, comprova-se que, de um modo geral, os resultados são equiparáveis entre os dois métodos, o que constitui um dado positivo, contrariando a ideia que o método hidrostático é pouco preciso. Assim sendo, a utilização do método hidrostático perante a



porosimetria de mercúrio é benéfica, uma vez que, que é mais fácil de executar, menos dispendioso e fiável no que diz respeito aos valores da porosidade aberta e das massas volúmicas referentes às argamassas em estudo. A razão pela qual os valores obtidos no ensaio de porosimetria de mercúrio serem maiores pode-se justificar pela possível “destruição” da estrutura porosa dos provetes provocada pela pressão exercida na intrusão de mercúrio.

### Características mecânicas

Na figura 5.10 apresentam-se os valores médios e os desvios padrão do módulo de elasticidade dinâmico dos provetes Ai-1 a Ai-3 ensaiados aos 90 dias e dos provetes Bi-4 a Bi-6 ensaiados aos 111 dias (após o contacto com a água).



Ca – cal aérea; CVC – cinzas volantes conformes; CVNC – cinzas volantes não conformes; AN – areia normalizada

Figura 5.10 – Módulo de elasticidade dos provetes ensaiados

1ª parte (fundo verde) e 2ª parte (fundo rosa):

A análise às duas partes é igual, nesse sentido, optou-se por fazê-la em conjunto.

- O valor do módulo de elasticidade ( $E_{din}$ ) dos provetes ensaiados aos 90 dias Ai-1 a Ai-3 e aos 111 dias Bi-4 a Bi-6 aumentou consideravelmente com a adição de cinzas volantes conformes (fundo verde) e não conformes (fundo rosa) quando comparados com os provetes da argamassa de referência (A0). Perante esta ocorrência, verifica-se que a adição de cinzas volantes beneficia o aumento  $E_{din}$ , independentemente do seu tipo (conformes ou não conformes), significando que o material ficou mais homogêneo e, consequentemente, mais compacto (mais rígido).

- O valor de  $E_{din}$  dos provetes ensaiados aos 90 dias Ai-1 a Ai-3 é superior em relação aos provetes ensaiados aos 111 dias Bi-4 a Bi-6.

3ª Parte (cinzas volantes conformes e não conformes – barras azuis e vermelhas):

- O valor de  $E_{din}$  nos provetes com cinzas conformes é maior do que nos provetes com cinzas não conformes, independentemente da sua percentagem.

A evolução do módulo de elasticidade dinâmico pode ser explicada pela compacidade e pela massa volúmica aparente, cujas relações serão feitas nas figuras 5.15 no ponto 5.22.

Na figura 5.11 referem-se os valores médios e os desvios padrão das resistências (à tracção por flexão e à compressão) dos provetes Ai-1 a Ai-3 ensaiados aos 90 dias, dos provetes Bi-1 a Bi-3 e dos provetes Bi-4 a Bi-6, ambos ensaiados aos 111 dias (após o contacto com a água).

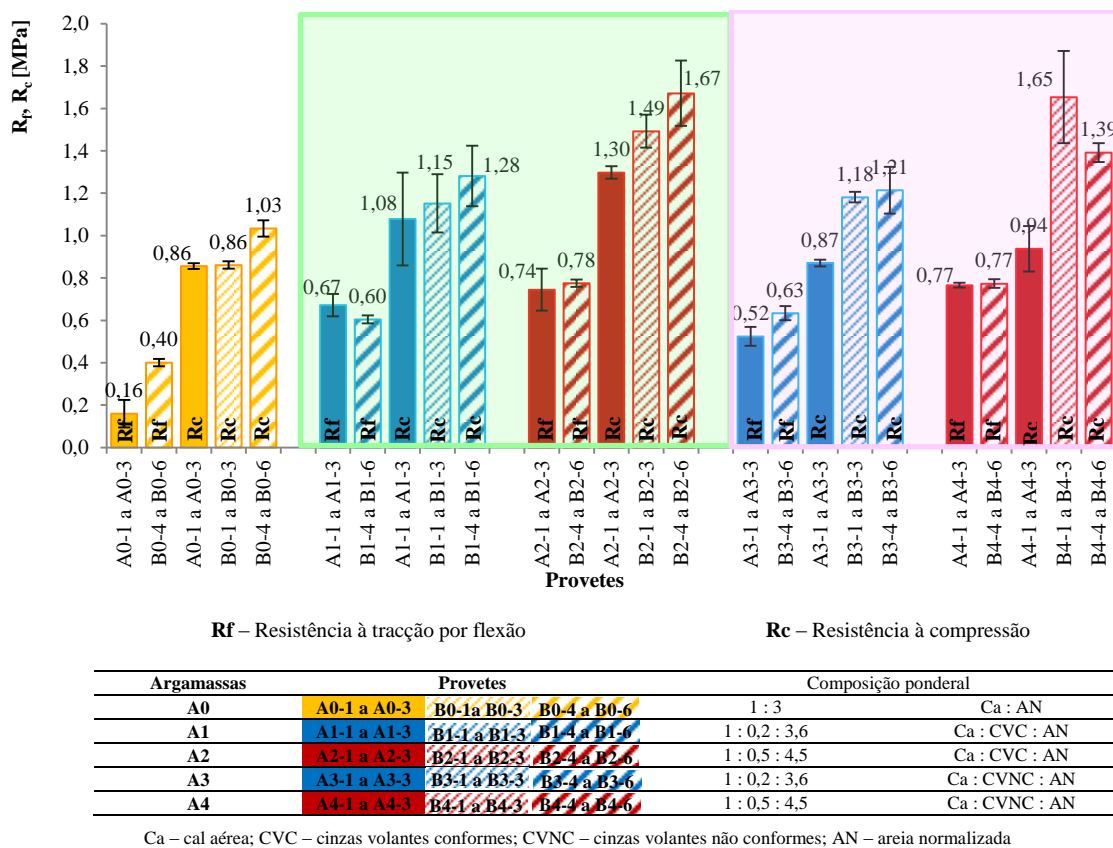


Figura 5.11 – Resistência à tracção por flexão dos provetes ensaiados

1ª parte (fundo verde) e 2ª parte (fundo rosa)

A análise é a equivalente em ambas as partes sendo por isso, apresentada em simultâneo.

- Os valores das resistências ( $R_f$  e  $R_c$ ) dos provetes Ai-1 a Ai-3 (ensaiados aos 90 dias) aumentam com incorporação de cinzas conformes (fundo verde) e não conformes (fundo rosa) relativamente aos provetes da argamassa de referência (A0). Este aumento das resistências pode-se justificar pela existência de sílica e alumina na constituição das

cinzas volantes (conformes e não conformes) que na presença da água formam aluminatos e silicatos hidratados (reações de hidratação) e pelo processo de endurecimento das argamassas com cal aérea ser lento devido às reações de carbonatação. Contudo, nos provetes com cinzas volantes não conformes, as reações de hidratação são parcialmente substituídas, pois uma parte deste tipo de cinzas é formada por teores de inqueimados (carbono livre), atribuindo, também, uma função de enchimento (filer).

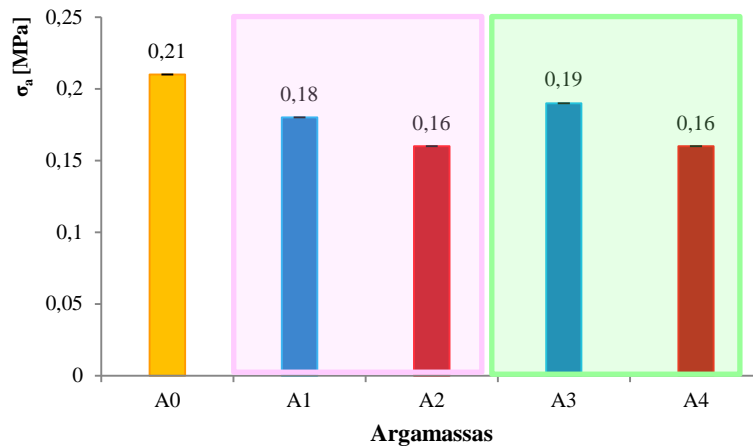
- Os provetes do tipo Bi-1 a Bi-3 e Bi-4 a Bi-6 (após o contato com a água) têm resistências superiores, de um modo geral, aos provetes Ai-1 a Ai-3. Este comportamento pode-se explicar por dois motivos. O primeiro motivo é que os provetes (Bi-4 a Bi-6) com cinzas volantes (conformes e não conformes) ao estarem de novo na presença da água permitiram que a sílica e a alumina que não reagiram anteriormente, reagissem e se transformassem em aluminatos e silicatos de cálcio; o segundo motivo está relacionado com o processo de endurecimento (reações de carbonatação) das argamassas com cal aérea ser lento, necessitando que o dióxido de carbono penetre em toda a argamassa para que ocorram as reações de carbonatação.

### 3ª Parte (cinzas volantes conformes e não conformes – barras azuis e vermelhas):

- De um modo geral, os valores das resistências ( $R_f$  e  $R_c$ ) dos provetes com cinzas volantes conformes (A1 e A2) são superiores aos dos provetes com cinzas volantes não conformes (A3 e A4), como era previsto.

O desenvolvimento das resistências pode ser explicado com a porosidade aberta, cuja relação é apresentada na figura 5.16 do ponto 5.2.2.

Na figura 5.12 podem-se observar os valores médios e os desvios padrão da tensão de aderência das cinco argamassas.



Argamassas	Composição ponderal	
A0	1 : 3	Ca : AN
A1	1 : 0,2 : 3,6	Ca : CVC : AN
A2	1 : 0,5 : 4,5	Ca : CVC : AN
A3	1 : 0,2 : 3,6	Ca : CVNC : AN
A4	1 : 0,5 : 4,5	Ca : CVNC : AN

Ca – cal aérea; CVC – cinzas volantes conformes; CVNC – cinzas volantes não conformes; AN – areia normalizada

Figura 5.12 – Tensão de aderência dos provetes

#### 1ª parte (fundo verde) e 2ª parte (fundo rosa)

A análise é comum às duas partes, por isso, optou-se por fazê-la em simultâneo.

- À medida que se adiciona cinzas volantes conformes (A1 e A2) ou não conformes (A3 e A4) o valor da tensão de aderência ( $\sigma_a$ ) diminuiu.

#### 3ª Parte (cinzas volantes conformes e não conformes – barras azuis e vermelhas):

- O valor de  $\sigma_a$  nas argamassas com maior teor de cinzas volantes conformes e não conformes (A2 e A4) é menor do que nas argamassas com menor percentagem de cinzas (A1 e A3).

### 5.2.2. Análise conjunta

Esta análise consiste em fazer o cruzamento entre características físicas e mecânicas, permitindo compreender o comportamento das argamassas. Nesse sentido, a presente discussão é apresentada segundo o seu comportamento face à acção da água e o seu comportamento mecânico.

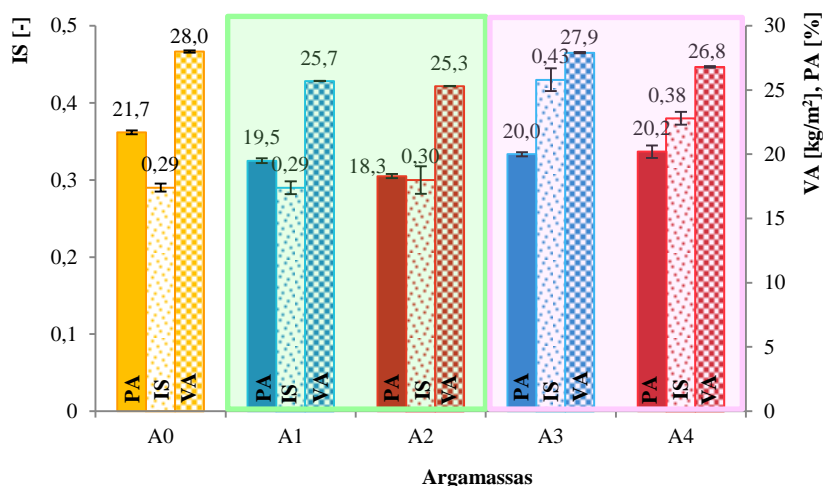
#### **Comportamento face à acção da água**

O desempenho das argamassas perante à acção da água e da humidade foi estudado através dos ensaios de absorção de água por capilaridade e de secagem, cuja interpretação individual foi feita no ponto 5.2.1. Pretende-se, como comportamento ideal, que uma argamassa absorva pouca quantidade de água e de forma lenta, traduzindo num valor assintótico e num coeficiente de capilaridade baixos, respectivamente. Além disso, pretende-se que tenha uma secagem rápida e contínua, originando um elevado valor de taxa de secagem e um baixo valor de índice de secagem. Contudo, os parâmetros anteriormente referidos também são condicionados pela

estrutura interna, cuja avaliação foi realizada a partir da porosidade aberta e da porosimetria de mercúrio (dimensão dos poros).

Nesse contexto, a relação das características físicas foi efectuada do seguinte modo: índice de secagem com valor assintótico e com porosidade aberta, o coeficiente de capilaridade com a taxa de secagem e a porosimetria de mercúrio com o coeficiente de capilaridade.

A evolução do índice de secagem e do valor assintótico perante a evolução da porosidade aberta (pesagem hidrostática) é apresentada na figura 5.13, incluindo valores médios e desvios padrão. Como mencionado anteriormente, em termos de análise do valor assintótico só se considerou os provetes inteiros (Ai-4 a A0-6); por esse motivo, o valor do índice de secagem também é referente apenas aos mesmos provetes.



PA – Porosidade aberta    IS – Índice de secagem    VA – Valor assintótico

Argamassas		Composição ponderal	
A0		1 : 3	Ca : AN
A1		1 : 0,2 : 3,6	Ca : CVC : AN
A2		1 : 0,5 : 4,5	Ca : CVC : AN
A3		1 : 0,2 : 3,6	Ca : CVNC : AN
A4		1 : 0,5 : 4,5	Ca : CVNC : AN

Ca – cal aérea; CVC – cinzas volantes conformes; CVNC – cinzas volantes não conformes; AN – areia normalizada

Figura 5.13 – Porosidade, índice de secagem e valor assintótico das argamassas ensaiadas

#### 1ª parte (fundo verde) e 2ª parte (fundo rosa)

A presente interpretação dos resultados fez-se simultaneamente, pois é idêntica para ambas as partes.

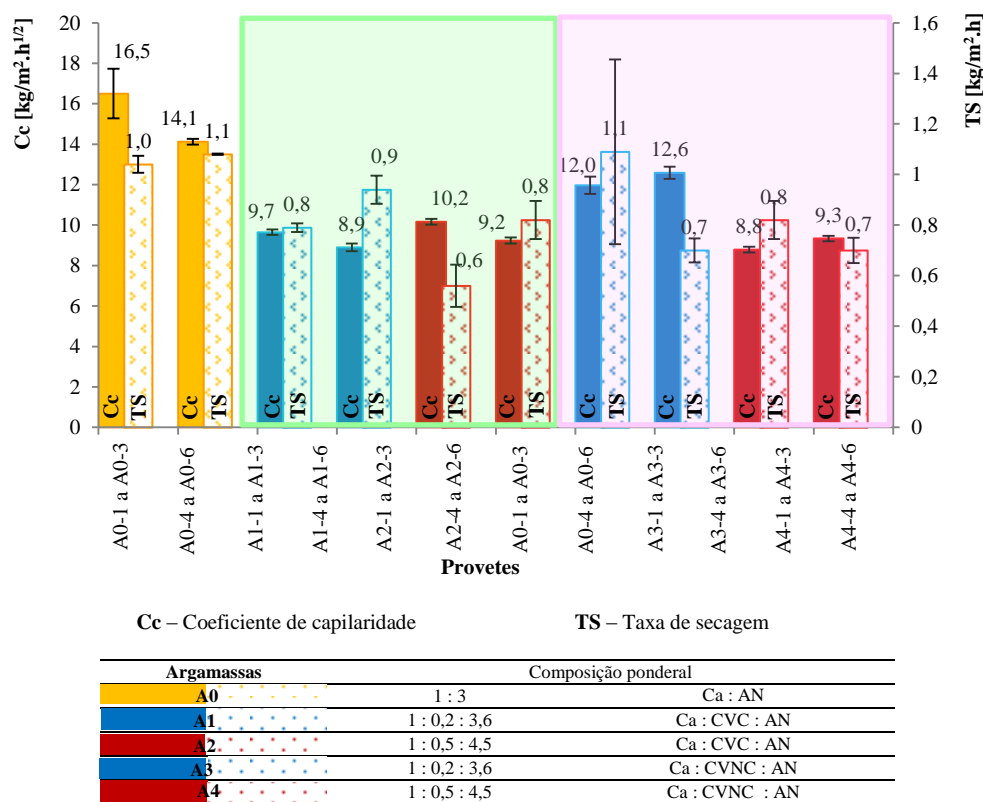
- Em termos gerais, à medida que se adiciona cinzas volantes conformes (A1 e A2) e cinzas volantes não conformes (A3 e A4) em relação à argamassa de referência (A0), verifica-se que o VA e o IS apresentam um andamento inverso; cruzando com a evolução da PA constata-se que acompanha a evolução de VA, concluindo-se assim que valores mais baixos de PA propiciam menores valores de VA e maiores valores de IS.

- A argamassa com maior percentagem de cinza volante conforme (A2) é a que tem menor VA (menor PA) e maior IS, isto é, absorve menos água (baixa percentagem de poros), mas tem maior dificuldade em libertá-la (fundo verde).
- A argamassa com maior teor de cinza volante não conforme (A4) é a que tem menor VA e maior IS, ou seja, absorve menos água, no entanto, tem maior dificuldade em secar (fundo rosa).

### 3ª Parte (cinzas volantes conformes e não conformes – barras azuis e vermelhas):

- Os valores de IS, VA e PA são maiores nas argamassas com cinzas volantes não conformes quando se compara com as argamassas com cinzas volantes conformes (A1/A3 e A2/A4); conclui-se assim que valores de PA mais elevados propiciam também maiores valores de VA e IS, ou seja, as argamassas com cinzas volantes não conformes absorvem mais água e têm mais dificuldade em secar.

A evolução do coeficiente de capilaridade e da taxa de secagem dos “meios provetes” (Ai-1 a Ai-3) e dos provetes inteiros (Ai-4 a Ai-6) é registada na figura 5.14, incluindo valores médios e desvios padrão.



a – cal aérea; CVC – cinzas volantes conformes; CVNC – cinzas volantes não conformes; AN – areia normalizada

Figura 5.14 – Coeficiente de capilaridade e taxa de secagem das argamassas ensaiadas

1ª parte (fundo verde) e 2ª parte (fundo rosa)

O comentário é comum às duas partes, por isso, apresenta-se em conjunto.

- De um modo geral, com a adição de cinzas volantes conformes (fundo verde) e não conformes (fundo rosa) relativamente à argamassa de referência (A0), constata-se que o valor do coeficiente de capilaridade (Cc) e da taxa de secagem (TS) diminuíram, ou seja, as argamassas de A1 a A4 absorvem água com menor rapidez, mas apresentam mais dificuldade em perdê-la.

3ª Parte (cinzas volantes conformes e não conformes – barras azuis e vermelhas):

- Genericamente, nas argamassas com a menor percentagem (1/6) de cinzas volantes conformes (A1) e não conformes (A3); verifica-se que Cc e Ts são maiores nas argamassas A3, isto é, absorvem rápido e têm dificuldade em perdê-la o que indicia um factor negativo. Esta evolução ocorre do mesmo modo, quando se compara as argamassas com 2/6 de cinzas volantes conformes (A2) e não conformes (A4).

A correlação entre a porosimetria de mercúrio e o coeficiente de capilaridade é apenas qualitativa, uma vez que o ensaio de porosimetria de mercúrio relaciona o tamanho (diâmetro) do poro com o seu volume de distribuição ou a sua densidade. Contudo, os resultados da porosimetria de mercúrio podem ser úteis na compreensão do fenómeno de ascensão capilar, nomeadamente no que diz respeito ao coeficiente capilar. É de referir que o “caminho” que o mercúrio tem que percorrer é de alguma forma idêntico ao percurso da água no decorrer do ensaio capilar. Os aspectos relacionados com a forma e a dimensão dos poros e com a sua acessibilidade são comuns aos dois ensaios. (Rato, 2006). Neste contexto, procede-se à análise da figura 5.2 (coeficiente de capilaridade) e da figura 5.8 (distribuição dos poros das argamassas ensaiadas) para o intervalo [0,1µm; 1µm].

1ª parte (fundo verde) e 2ª parte (fundo rosa) – análise equivalente:

- A argamassa de referência (A0) comparando com as argamassas com cinzas volantes conformes (A1 e A2) e não conformes (A3 e A4) é a que apresenta maior quantidade de menores diâmetros (figura 5.8) o que implica que o coeficiente de capilaridade seja maior (absorve mais rápido), como se pode observar na figura 5.2.

3ª Parte (cinzas volantes conformes e não conformes):

- Comparando as argamassas com cinzas volantes conformes (A1 e A2) e não conformes (A3 e A4) verifica-se que a tendência é a expectável.
- A argamassa A1 (conformes) relativamente à argamassa A3 (não conformes) apresenta poros com maiores dimensões o que propicia a um valor de coeficiente de capilaridade menor (absorve lentamente), como se observa na figura 5.2.

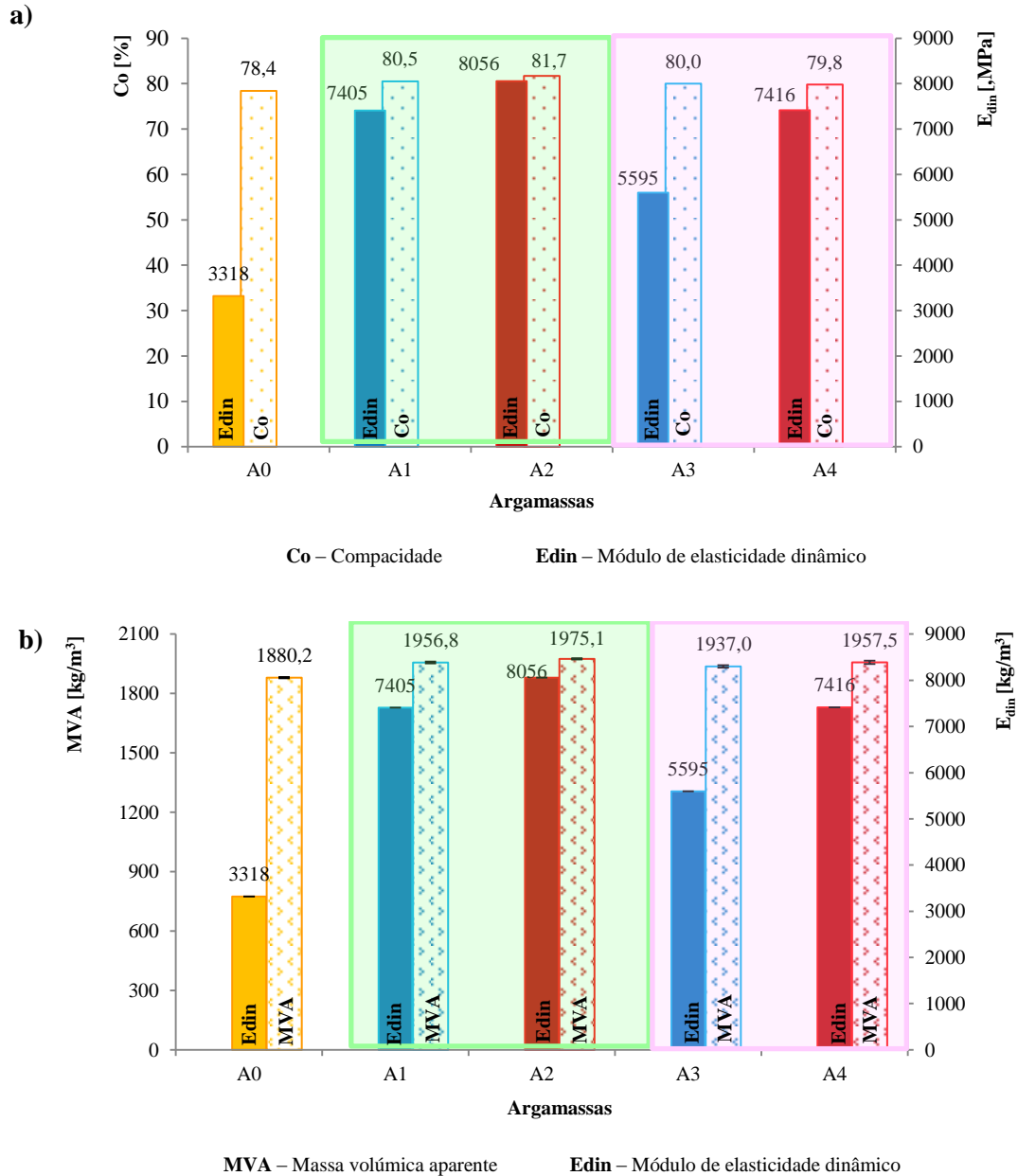
- A argamassa A2 (conformes) relativamente à argamassa A4 (não conformes) apresenta poros com menores dimensões o que propicia a um valor de coeficiente de capilaridade maior (absorve mais rápido), como se observa na figura 5.2.

### ***Comportamento mecânico***

Este comportamento é avaliado de acordo com as seguintes características: compactidade e módulo de elasticidade dinâmico; massa volúmica aparente e módulo de elasticidade; resistência à tracção por flexão e à compressão e porosidade aberta; resistência à tracção por flexão e à compressão e aderência ao suporte.

O módulo de elasticidade dinâmico está relacionado com a massa volúmica e com a compactidade de uma argamassa, variando de forma directamente proporcional. Na figura 5.15 registam-se os valores médios (90 dias) destes parâmetros.





**a** – Compacidade e módulo de elasticidade dinâmico; **b** – Massa volúmica aparente e módulo de elasticidade dinâmico

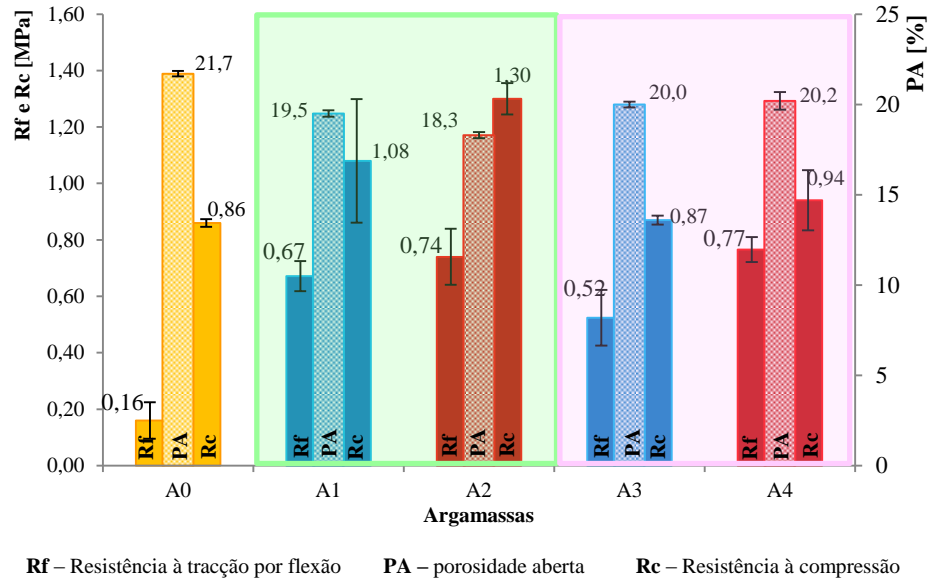
Argamassas	Composição ponderal	
A0	1 : 3	Ca : AN
A1	1 : 0,2 : 3,6	Ca : CVC : AN
A2	1 : 0,5 : 4,5	Ca : CVC : AN
A3	1 : 0,2 : 3,6	Ca : CVNC : AN
A4	1 : 0,5 : 4,5	Ca : CVNC : AN

Ca – cal aérea; CVC – cinzas volantes conformes; CVNC – cinzas volantes não conformes; AN – areia normalizada

Figura 5.15 – Módulo de elasticidade, compacidade e massa volúmica das argamassas ensaiadas

Analisando a figura verifica-se que à medida que a compacidade (a) (parâmetro complementar da porosidade aberta) e a massa volúmica aparente (b) aumentam, o valor do módulo de elasticidade dinâmico também aumenta. Assim sendo, comprova-se que quanto mais compacto e homogêneo, mais rígido é o material, implicando valores do módulo de elasticidade dinâmico mais elevados.

As resistências mecânicas variam na proporção inversa da porosidade aberta, cuja relação é apresentada na figura 5.16 que inclui valores médios os desvios padrão. Os valores das resistências mecânicas foram obtidos aos 90 dias.



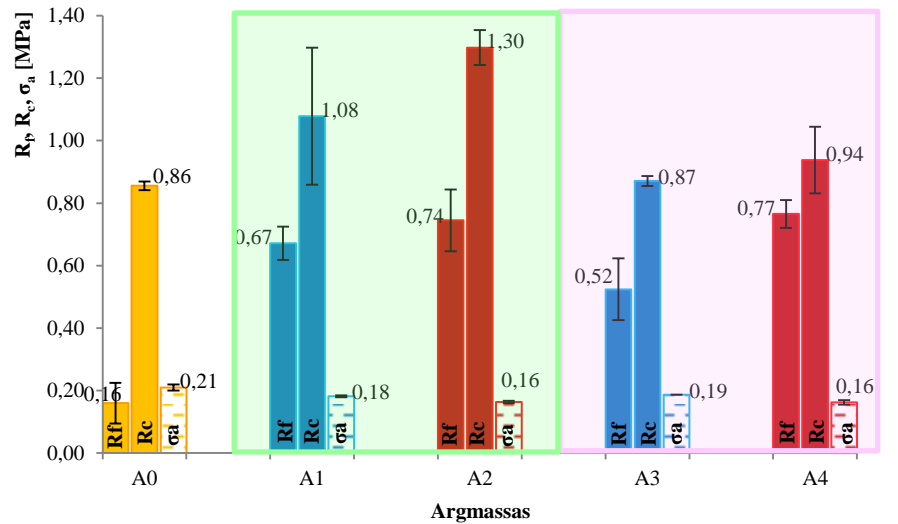
Argamassas	Composição ponderal	
A0	1 : 3	Ca : AN
A1	1 : 0,2 : 3,6	Ca : CVC : AN
A2	1 : 0,5 : 4,5	Ca : CVC : AN
A3	1 : 0,2 : 3,6	Ca : CVNC : AN
A4	1 : 0,5 : 4,5	Ca : CVNC : AN

Ca – cal aérea; CVC – cinzas volantes conformes; CVNC – cinzas volantes não conformes; AN – areia normalizada

Figura 5.16 – Resistências mecânicas e porosidade aberta das argamassas ensaiadas

Analisando a figura verifica-se que as resistências aumentam à medida que a porosidade aumenta como era previsível que acontecesse. Portanto, as resistências mecânicas são tanto maiores quanto menor a porosidade do material.

As resistências à tracção por flexão e à compressão e a aderência ao suporte não são características directamente relacionáveis entre si, no entanto, optou-se por fazer uma análise qualitativa. As resistências à tracção por flexão e à compressão (ensaiadas aos 90 dias) foram determinadas em provetes prismáticos e a tensão de aderência foi obtida através de provetes para o ensaio de aderência. Na figura 5.17 apresentam-se os valores médios e os desvios padrão das três resistências mecânicas.



Rf – Resistência à tracção por flexão      Rc – Resistência à compressão      σa – Tensão de aderência

Argmassas	Composição ponderal	
A0	1 : 3	Ca : AN
A1	1 : 0,2 : 3,6	Ca : CVC : AN
A2	1 : 0,5 : 4,5	Ca : CVC : AN
A3	1 : 0,2 : 3,6	Ca : CVNC : AN
A4	1 : 0,5 : 4,5	Ca : CVNC : AN

Ca – cal aérea; CVC – cinzas volantes conformes; CVNC – cinzas volantes não conformes; AN – areia normalizada

Figura 5.17 – Resistências mecânicas das argamassas ensaiadas

Observando a figura, detecta-se que os valores da tensão de aderência evoluem no sentido inverso das resistências à compressão e à flexão. À medida que as resistências à compressão e à flexão aumentam, a tensão de aderência diminui, o que não era espectável que acontecesse.

### 5.3. Comparação com trabalhos de outros autores

Nesta secção são recuperados, sob a forma de gráfico, os resultados mencionados no Capítulo 3 e os obtidos nesta dissertação, permitindo comparar simultaneamente características homólogas. A comparação dos resultados é realizada, tendo em consideração algumas diferenças ao nível da campanha experimental e da constituição das argamassas, nomeadamente: características (mecânicas e físicas) serem obtidas em idades diferentes; ensaios terem sido realizados por técnicos (pessoas) diferentes; nível de compactação diferente; desconhecimento do teor de inqueimados das cinzas volantes conformes e o traço volumétrico ser diferente nas argamassas de cal aérea e de cinzas volantes.

As características apresentadas são referentes às argamassas de cal aérea e às argamassas de cal aérea e cinzas volantes conformes.

#### 5.3.1. Características físicas das argamassas

As características físicas discutidas são absorção de água por capilaridade, valor assintótico, massas volúmicas e porosidade aberta.

**Absorção de água por capilaridade**

O coeficiente de absorção de água por capilaridade está relacionado com a porometria das argamassas. No entanto, como nem todos os trabalhos mencionados realizaram o ensaio de porosimetria de mercúrio, não foi possível estabelecer uma comparação entre valores. Assim sendo, relaciona-se o ensaio de absorção de água por capilaridade com a porosidade aberta.

Na figura 5.18 pode-se observar os valores do coeficiente de capilaridade dos “meios provetes” produzidos com argamassa de cal aérea.

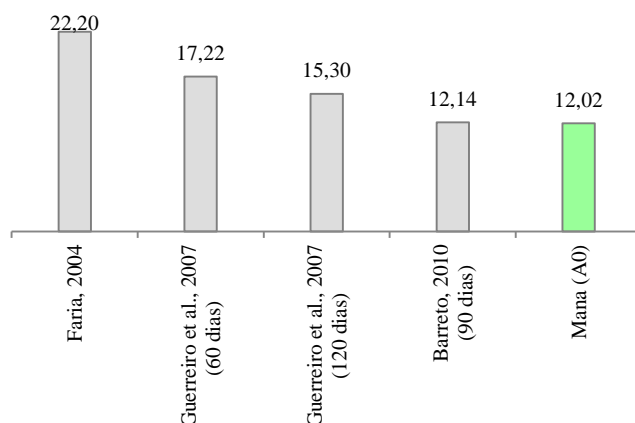


Figura 5.18 – Resultados obtidos do coeficiente de capilaridade das argamassas de cal aérea (“meios provetes”) [kg/m<sup>2</sup>.h<sup>1/2</sup>]

Analisando o gráfico, os valores do coeficiente de absorção de água por capilaridade dos outros autores (Faria, Guerreiro, Barreto) são superiores aos obtidos no presente estudo, o que se deve a valores de porosidade aberta também maiores, como se observa no gráfico da figura 5.22 (Faria, 2004; C. Guerreiro *et al.*, 2007; Barreto, 2010).

Na figura 5.19 apresentam-se os valores do coeficiente de capilaridade dos provetes inteiros produzidos com argamassa de cal aérea.

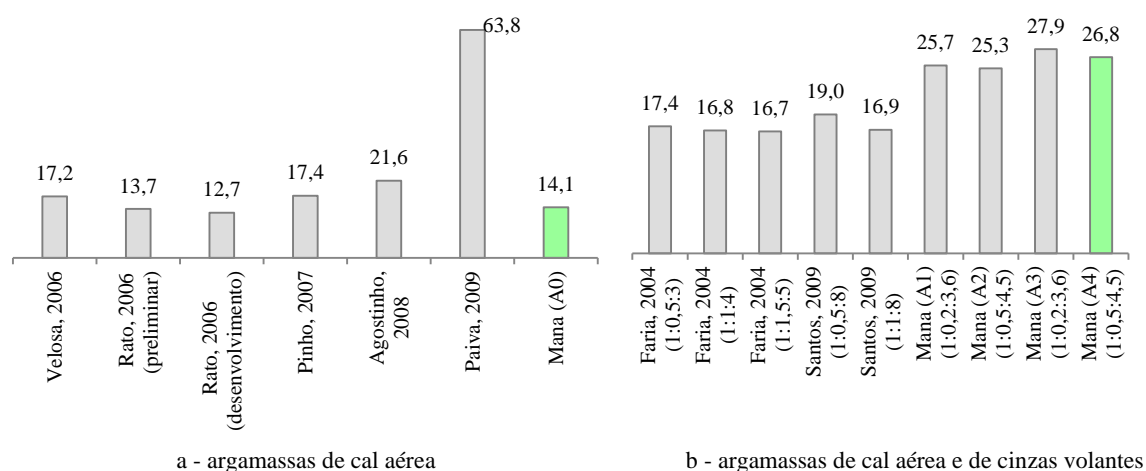


Figura 5.19 – Resultados obtidos do coeficiente de capilaridade [kg/m<sup>2</sup>.h<sup>1/2</sup>]

Os valores assintóticos analisados são referentes apenas aos provetes inteiros, uma vez que não são conhecidas as dimensões dos “meios provetes” ensaiados pelos outros autores. Como referido anteriormente, o valor assintótico está relacionado com a porosidade aberta, por isso, nas situações que foi possível, fez-se esse paralelismo. Na figura 5.20, apresenta-se os valores assintóticos das argamassas de cal aérea (a) e das argamassas cal aérea e cinzas volantes (b) obtidos na presente dissertação e por outros autores.

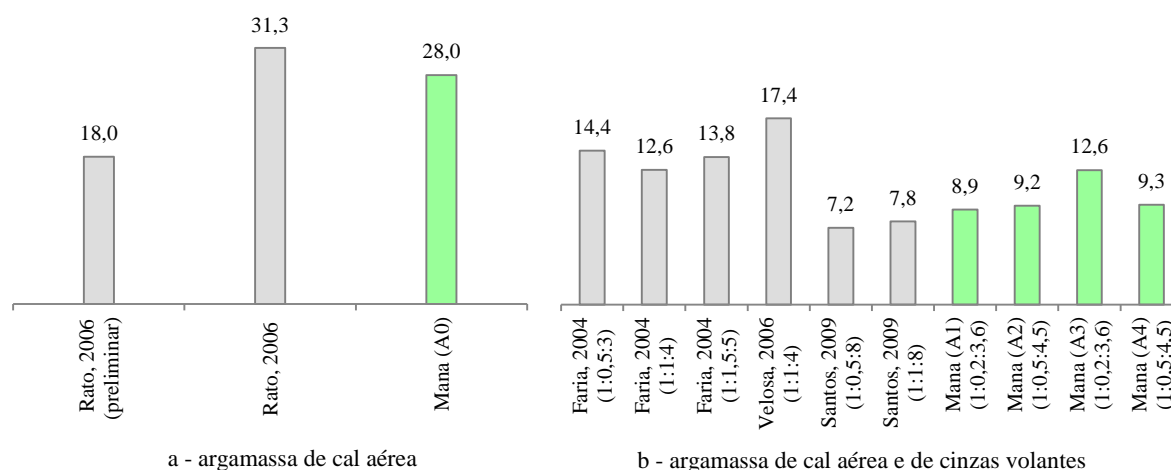


Figura 5.20 – Resultados obtidos do valor assintótico (provetes inteiros) [kg/m²]

#### Argamassa de cal aérea

- O valor assintótico de Rato obtido aos 60 dias (avaliação preliminar) é inferior ao valor no presente trabalho, logo o valor de porosidade aberta também deveria ser menor, o que não se observa na figura 5.22 (Rato, 2006).
- O valor assintótico de Rato obtido aos 68 dias (desenvolvimento experimental) é superior ao valor do presente estudo, o que significa que o valor de porosidade aberta também tem que ser maior, como que se observa na figura 5.22 (Rato, 2006).

#### Argamassa de cal aérea e cinzas volantes

- Como Santos e Velosa não determinaram o valor da porosidade aberta, assim sendo, só se pode comparar qualitativamente. Os valores de porosidade aberta do presente estudo são superiores ao de Santos e inferiores ao de Velosa (Santos, 2009; Velosa, 2006).
- Os valores assintóticos de Faria são superiores aos valores obtidos neste trabalho, o que implica que os valores de porosidade aberta também têm que ser maiores, como se confirma na figura 5.22 (Faria, 2004).

#### ***Massa volúmica real e aparente***

Os valores das massas volúmicas reais não são tratados porque não influenciam o comportamento das argamassas, uma vez que, não são contabilizados os vazios (poros) que constituem as

argamassas. Assim sendo, só se apresentam os valores das massas volúmicas aparentes das argamassas de cal aérea, figura 5.21.

A massa volúmica é uma característica que se relaciona em proporcionalidade directa com as resistências mecânicas e indirecta com a porosidade aberta. Nesse sentido, a sua análise só é feita em comparação com esses parâmetros.

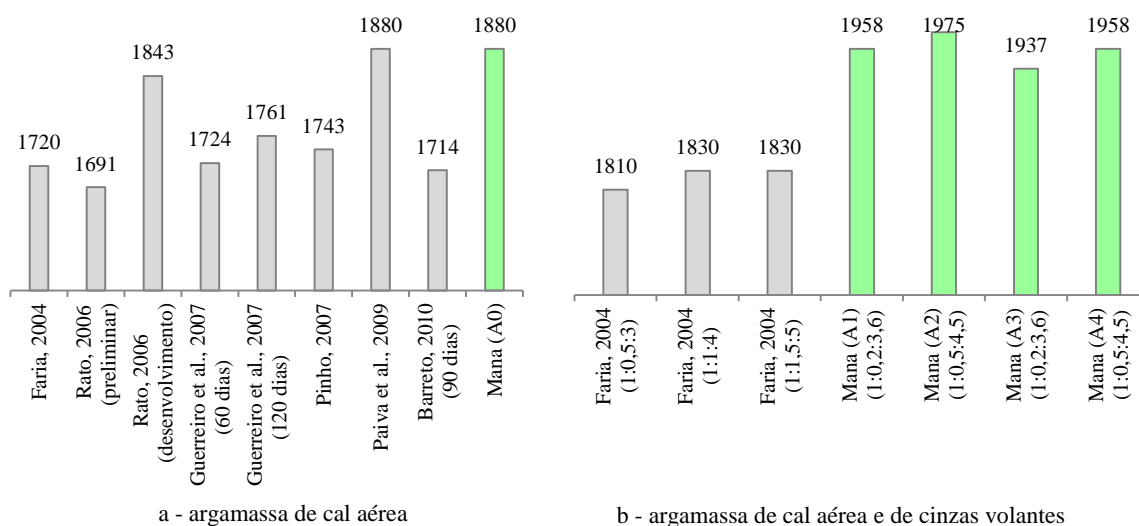


Figura 5.21 – Resultados obtidos no ensaio das massas volúmicas das argamassas de cal aérea [kg/m³]

### **Porosidade aberta**

A porosidade aberta é uma propriedade que influencia o desempenho das argamassas, pois interfere na sua compacidade e, consequentemente nas resistências mecânicas e no módulo de elasticidade. Sabe-se que quanto maior a porosidade aberta, menos compacto é o material, logo menor são as resistências mecânicas e o módulo de elasticidade. Na figura 5.22 estão indicados os valores obtidos no ensaio de porosidade aberta à argamassa de cal aérea da presente dissertação e de outros autores.

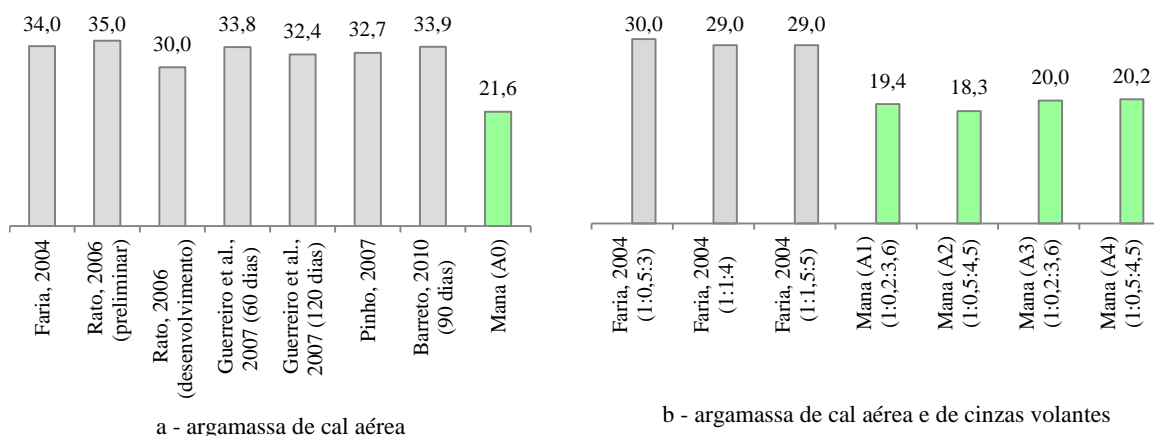


Figura 5.22 – Resultados obtidos do ensaio de porosidade das argamassas [%]

#### Argamassa de cal aérea

- O valor da porosidade aberta (PA) obtido no presente estudo é inferior quando comparado com Faria, Rato (preliminar), Guerreiro *et al.* (60 dias e 120 dias). Pinho e Barreto o que implicaria maior módulo de elasticidade (figura 5.23) e maiores resistências mecânicas (figura 5.24). Contudo, isso não acontece com os valores das resistências à tracção por flexão (Faria, 2004; Rato, 2006; Guerreiro *et al.*, 2007; Pinho, 2007; Barreto, 2010).
- Para um maior valor de PA determinado por Rato (preliminar e desenvolvimento) relativamente ao valor do presente trabalho, conduziria a menores valores de resistência mecânica e de módulo de elasticidade. Porém no estudo preliminar, não se verifica nenhuma destas situações. Por oposição, no desenvolvimento experimental, não se constata apenas no valor das resistências mecânicas que deveria ser menor (Rato, 2006).

#### Argamassa de cal aérea e cinzas volantes

- Os valores de porosidade obtidos no presente trabalho são inferiores aos do estudo de Faria; assim sendo, conduz a valores de resistências mecânicas maiores, como se verifica na figura 5.24 (Faria, 2004).

### **5.3.2. Características mecânicas das argamassas**

As características físicas abordadas são o módulo de elasticidade dinâmico, resistência à compressão e à tracção por flexão.

#### ***Módulo de elasticidade dinâmico***

Na figura 5.23 referem-se os resultados das resistências mecânicas das argamassas de cal aérea e das argamassas de cal aérea e de cinzas volantes obtidos nesta dissertação e nos trabalhos de investigação de outros autores.

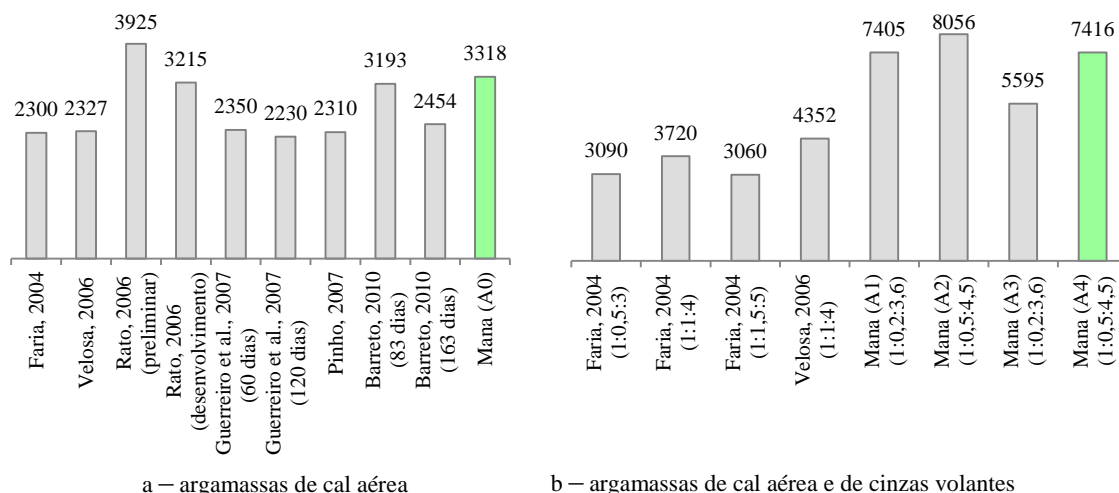


Figura 5.23 – Resultados obtidos do ensaio do módulo de elasticidade [MPa]

#### Argamassa de cal aérea

- O valor do módulo de elasticidade ( $E_{din}$ ) obtido no presente trabalho é superior quando comparado com Faria, Rato (desenvolvimento), Guerreiro *et al.* (60 dias e 120 dias), Pinho e Barreto, como seria de esperar, pois o valor da massa volúmica aparente também é superior, como se observa na figura 5.21. (Faria, 2004; Rato, 2006; Guerreiro *et al.*, 2007; Pinho, 2007; Barreto, 2010).
- O valor do  $E_{din}$  obtido nesta dissertação é inferior ao de Rato (preliminar), sendo assim, era espectável que o resultado da massa volúmica aparente também fosse inferior, o que não aconteceu como se pode verificar na figura 5.21.

#### Argamassa de cal aérea e de cinzas volantes

- Velosa não realizou o ensaio da massa volúmica aparente, assim sendo, a comparação é qualitativa. Os valores do  $E_{din}$  determinados na presente dissertação são superiores o que significa que são materiais mais homogêneos e, consequentemente, mais rígidos (Velosa, 2006).
- Os valores do  $E_{din}$  de Faria são inferiores aos obtidos no presente estudo, como seria de esperar, uma vez que, os valores da massa volúmica aparente também são inferiores, como se constata na figura 5.21 (Faria, 2004).

#### ***Resistência à tracção por flexão e compressão***

Na figura 5.24 apresentam-se os resultados das resistências mecânicas das argamassas de cal aérea e das argamassas de cal aérea e de cinzas volantes obtidos na presente dissertação e nos trabalhos de investigação de outros autores.



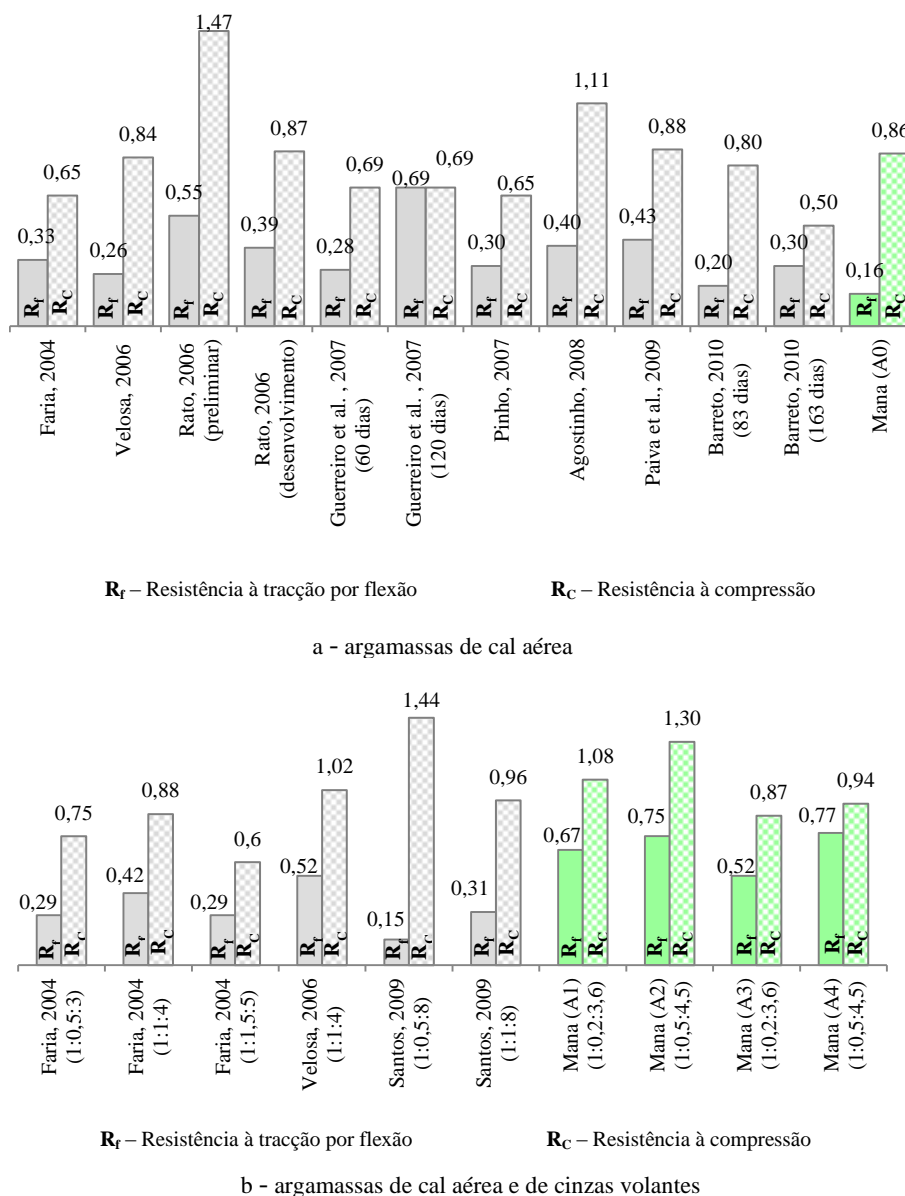


Figura 5.24 – Resultados obtidos dos ensaios das resistências mecânicas [MPa]

#### Argamassa de cal aérea

- O valor da massa volúmica aparente (MVA) de Faria, Guerreiro *et al.* (60 e 120 dias), Barreto e Pinho é inferior ao obtido no presente estudo (figura 5.21), conduzindo a um valor da porosidade aberta (PA) superior (figura 5.22) e, por conseguinte, a valores de resistências mecânicas inferiores, como se constatou. Contudo, isso não se verifica na resistência à tracção por flexão (Faria, 2004; C. Guerreiro *et al.*, 2007; Pinho, 2007; Barreto, 2010).
- O valor de MVA (figura 5.21) de Rato (preliminar e desenvolvimento) é inferior ao obtido nesta dissertação, conduzindo a valores de PA superiores (figura 5.22) e,

consequentemente, menores valores de resistências mecânicas, o que não se verifica (Rato, 2006).

- Paiva *et al* e Velosa não determinaram o valor da porosidade aberta. Nesse sentido, apenas se pode afirmar que os valores das resistências mecânicas são próximos dos obtidos na presente dissertação (Paiva etl al., 2009; Velosa, 2006).

#### Argamassa de cal aérea e de cinzas volantes

- Como Velosa e Santos não calcularam o valor da porosidade aberta apenas se pode dizer que os valores das resistências mecânicas têm a mesma ordem de grandeza dos valores obtidos no presente estudo (Velosa, 2006; Santos, 2009).
- Os valores de MVA (figura 5.21) de Faria são inferiores aos do presente estudo, o que implica valores de PA superiores (figura 5.22), e consequentemente valores de resistências mecânicas inferiores, como se verificou (Faria, 2004).

# CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

### 6.1. Considerações iniciais

Neste capítulo final apresentam-se as principais conclusões e comentários finais do presente estudo, faz-se uma análise sobre os objectivos propostos e os atingidos e, por fim, incluem-se propostas de desenvolvimentos futuros.

### 6.2. Conclusões e comentários finais

A dissertação foi iniciada com uma breve apresentação teórica sobre a tipificação e variedade de argamassas (composição, produção e função) e a caracterização e classificação das cinzas volantes (baseada em normas europeias). O enquadramento teórico foi complementado por uma pesquisa bibliográfica sobre trabalhos de investigação de argamassas homólogas, servindo assim de referência aos valores obtidos no presente estudo. Posteriormente, realizou-se um trabalho experimental com vista a avaliar o comportamento mecânico e o comportamento face à acção da água das argamassas com cinzas volantes não conformes. A partir dos resultados obtidos foram estabelecidas conclusões que permitiram analisar e relacionar as argamassas estudadas.

O estudo desenvolvido enquadra-se num trabalho de investigação sugerido pela empresa de gestão resíduos (RCD) – Sociedade Gestora de Resíduos, S.A na perspectiva de um futuro protocolo com a Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Nas conclusões considera-se o efeito das cinzas volantes não conformes em argamassas de cal aérea. Nesse sentido, relaciona-se as argamassas com cinzas volantes não conformes com a argamassa de referência (sem cinzas volantes) e com as argamassas com cinzas volantes conformes, tendo em conta o comportamento mecânico e comportamento face à acção da água.

#### ***Relação entre as argamassas com cinzas volantes não conformes e a argamassa de referência***

Quanto ao comportamento face à acção da água, constatou-se que a adição de cinzas volantes não conformes proporcionou à argamassa a absorção de uma menor quantidade de água (valor assintótico), uma vez que são menos porosas, mas por outro lado, dificultou a sua secagem

(índice de secagem). No que diz respeito à velocidade inicial de absorção de água por capilaridade (coeficiente de capilaridade) e de secagem (taxa de secagem) verifica-se que as argamassas com cinzas volantes não conformes absorvem e secam de forma mais lenta.

Relativamente ao comportamento mecânico, observou-se que adição de cinzas volantes não conformes, independentemente da sua percentagem, aumentou os valores de resistências mecânicas (à compressão e à tracção por flexão), devido aos compostos hidratados que se formam (aluminatos e silicatos de cálcio). Para além disso, as cinzas volantes não conformes desempenham, também, uma função de enchimento (filer).

### ***Relação entre as argamassas com cinzas volantes não conformes e as argamassas com cinzas volantes conformes***

Em termos de comportamento face à acção da água, verificou-se que as argamassas com cinzas volantes não conformes, independentemente da sua quantidade, absorvem mais água por capilaridade, pois são mais porosas, e têm uma maior dificuldade em secar. No que diz respeito à velocidade inicial de absorção de água por capilaridade e de secagem constatou-se duas situações: para baixos teores de cinzas volantes (traço volumétrico - 1:0,2:3,6), conformes e não conformes, estes parâmetros não sofreram alteração; por oposição aos teores mais elevados de cinzas volantes (traço volumétrico - 1:0,5:4,5), onde se verificou que as argamassas com cinzas volantes não conformes absorvem lentamente a água mas também secam de forma mais lenta.

Em relação ao comportamento mecânico, observou-se que as argamassas com cinzas volantes não conformes têm valores inferiores de resistências mecânicas (à compressão e à tracção por flexão), facto que pode ser justificado pela substituição parcial de reacções de hidratação, uma vez que, para um mesmo volume de cinzas volantes conformes e não conformes, o volume das não conformes também é composto por teores de inqueimados.

Após o contacto das argamassas com a água, determinaram-se de novo as resistências mecânicas das argamassas com cinzas volantes não conformes, tendo sido observado um aumento. Esta situação pode ter ocorrido por dois motivos: primeiro, as cinzas volantes ao estarem de novo em contacto com a água, permitiram que a sílica e alumina que não reagiram anteriormente, reagissem, formando silicatos e aluminatos hidratados; segundo, a cura de argamassas com cal aérea é lenta devido às reacções de carbonatação.

Os resultados obtidos no ensaio de aderência ao suporte não estão de acordo com o esperado, nomeadamente quando comparados com os valores obtidos nas resistências à tracção por flexão e à compressão. Salienta-se para a existência de factores de variabilidade, nomeadamente o modo como foi aplicada a argamassa no suporte, que deveria ter incluído pelo menos três camadas de revestimento.

Em suma, pode-se afirmar que os resultados obtidos, de forma geral, permitiram relacionar as diferentes características das argamassas estudadas, e daqui resulta o interesse em aprofundar o presente tema, utilizando percentagens de inqueimados sucessivamente maiores. Desta forma, amplia-se as conclusões obtidas.

### **6.3. Objectivos propostos e alcançados**

Como referido na secção 1.2, a presente dissertação teve como objectivo o estudo do comportamento mecânico e físico de argamassas de cal aérea com cinzas volantes não conformes para fins não estruturais. Posto isto, pode-se afirmar que, em geral, o objectivo foi alcançado.

### **6.4. Desenvolvimentos futuros**

Tendo em consideração que este trabalho está integrado num conjunto de trabalhos de investigação referentes à sustentabilidade de materiais na construção propõe-se aprofundar e desenvolver alguns aspectos relacionados com o estudo da influência das cinzas volantes não conformes na formulação de argamassas de cal aérea, nomeadamente:

- aprofundar o estudo da aplicação de cinzas volantes não conformes em argamassas de cal aérea, efectuando novas argamassas com diferentes percentagens de cinzas volantes não conformes e teores de inqueimados maiores;
- repetir o ensaio de aderência, incluindo pelo menos as três camadas que constituem o revestimento;
- realizar os ensaios de caracterização física e mecânica das argamassas em idades diferentes para analisar a sua evolução ao longo do tempo.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFIAS

- ABREU, Cátia (2013) – *Caracterização de betão com terra através de provetes laminares*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- AGOSTINHO, Cláudia (2008) – *Estudo da evolução do desempenho no tempo de argamassas de cal aérea*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- ALMEIDA, Nuno; FARIA, Paulina; PINTO, ANA (2007) – *Argamassas com base em cal aérea e cinzas de casca de arroz para conservação*. 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, Associação Portuguesa dos Fabricantes de Argamassas de Construção, Lisboa.
- ALVAREZ, José; SEQUEIRA, Cristina; COSTA, Marta (2005) – *Ensinamentos a retirar do passado histórico das argamassas*. 1º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, Associação Portuguesa dos Fabricantes de Argamassas de Construção, Lisboa.
- ALVES, José (2009) – *Argamassas leves para execução de camadas de regularização e de enchimento de pavimentos*. Dissertação de Mestrado, Área Departamental de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- BARRA, Ana (2011) – *Caracterização física e mecânica de argamassas não estruturais com agregados finos reciclados*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- BARRETO, Carolina (2010) – *Durabilidade de argamassas de cal aérea e bastardas face à acção de sais solúveis*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- BASTOS, Pedro; NAKAKURA, Elza; CINCOTTO, Maria (2005) – *Ensaio de retração de argamassas nos estados fresco e endurecido- Contribuição para a normalização brasileira*, 1º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, Associação Portuguesa dos Fabricantes de Argamassas de Construção, Lisboa.
- BRITO, Vânia (2009) – *Influência dos revestimentos por pintura na secagem do suporte*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- CAMÕES, Aires (2005) – *Betões de elevado desempenho com elevado volume de cinzas volantes*. Universidade do Minho, Centro de Engenharia Civil, Revista nº23 (pág. 55 – 64).

CARASEK, Helena – *Argamassas*. Universidade Federal de Goiás, website:

[http://aquarius.ime.eb.br/~moniz/matconst2/argamassa\\_ibracon\\_cap26\\_apresentacao.pdf](http://aquarius.ime.eb.br/~moniz/matconst2/argamassa_ibracon_cap26_apresentacao.pdf), em Janeiro de 2013.

CEN. (2010) EN 998-1 – *Specification for mortar for masonry Part 1: Masonry mortar*. Brussels.

COELHO, Ana; JALALI, Said; TORGAL, Fernando Pacheco (2010) – *Desempenho comparado entre argamassas comerciais para a reabilitação e argamassas de cal aérea e metacaulino*.

Congresso Português de Argamassas de Construção, Associação Portuguesa dos Fabricantes de Argamassas de Construção, Lisboa.

COUTO, João; MOREIRA, Nelson (2007) – *Caracterização e exigências funcionais dos massames e argamassas de regularização*. 2º Congresso Nacional de argamassas de construção, “Sob a égide da reabilitação”, Associação Portuguesa dos Fabricantes de Argamassas de Construção, Lisboa.

COUTO, Sandra (2010) – *Utilização de hidrófugos de superfície em materiais cerâmicos. Influência na secagem*. Dissertação mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

COSTA, Marienne (2010) – *Tecnologia de argamassas*. Departamento de Construção Civil. Universidade Federal do Paraná, website:

[http://www.dcc.ufpr.br/wiki/images/8/85/TC034\\_Argamassas\\_Marienne.pdf](http://www.dcc.ufpr.br/wiki/images/8/85/TC034_Argamassas_Marienne.pdf), em Janeiro de 2013.

DUBAJ, Eduardo (2000) – *Estudo comparativo entre traços de argamassas de revestimento utilizadas em Porto Alegre*. Dissertação de Pós-graduação. Escola de Engenharia, Universidade do Rio Grande do Sul.

FARIA, Joana; TORGAL, Fernando P.; JALALI, Said (2011) – *Desenvolvimento de argamassas para a reabilitação de edifícios antigos. Parte 2 – Comportamento à água*. Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho. Revista nº39.

FARIA, Paulina (2004) – *Argamassas de revestimento para alvenarias antigas: Contribuição para o estudo da influência dos ligantes*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

FARIA, Paulina; HENRIQUES, Fernando M. A. (2006) – *Subprodutos industriais como componentes pozolânicos em argamassas de cal aérea*. 2º Encontro Nacional sobre Patologia e Reabilitação de edifícios. PATORREB, Porto.

FARIA, Paulina (2012) – *Argamassas sustentáveis*. 2ª Conferência Construção e Reabilitação Sustentável de Edifícios no Espaço Lusófono, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

FERRAZ, Eduardo; ANDREJKOVIČOVÁ, Slávka; SANTOS-SILVA, A.; ROCHA, Fernando; VELOSA, Ana (2012) – *Utilização do ensaio de Chapalle modificado para avaliação da reactividade pozolânica de metacaulinos*. 4º Congresso Português de Argamassas e ETICS, Auditoria da Reitoria da Universidade de Coimbra.



---

FREITAS, José (n.d.) – *Revestimento em argamassas e gesso*. Construção Civil II, Universidade Federal do Paraná, website:

[http://www.dcc.ufpr.br/mediawiki/images/4/44/TC025\\_Revestimentos\\_verticais\\_B.pdf](http://www.dcc.ufpr.br/mediawiki/images/4/44/TC025_Revestimentos_verticais_B.pdf), consulta Dezembro 2012.

GASPAR, Sara (2011) – *Análise da interface entre elementos de parede e camadas de revestimento*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.

GIBBONS, Pat (1997) – *Pozzolans for Lime Mortars*. The Conservation and Repair of Ecclesiastical Buildings, website: <http://www.buildingconservation.com>, em Dezembro 2012.

GOMES, Idália; GONÇALVES, Teresa; FARIA, Paulina (2012) – *Análise experimental de argamassas de terra com cais e fibras naturais*. 4º Congresso Português de Argamassas e ETICS, Auditoria da Reitoria da Universidade de Coimbra.

GONÇALVES, Teresa (2007) – *Salt crystallization in plastered or rendered walls*. Tese de Doutoramento. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.

GRAYMOUNT (n.d.) – website:

[http://www.graymont.com/applications\\_history\\_lime\\_mortar.shtml](http://www.graymont.com/applications_history_lime_mortar.shtml), em Dezembro de 2012.

GUERREIRO, Carlos; HENRIQUES, Fernando M. A.; PINTO, Ana P. (2007) - *Análise comparativa de argamassas de cal aérea, medianamente hidráulicas e de ligantes mistos para rebocos de edifícios antigos*. 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, 22-23 Novembro, Auditório I da FIL, Parque das Nações, Lisboa.

HENRIQUES, Jorge (2012) – *Manual de acolhimento*, Central Termoelétrica do Pego.

INSTITUTO PORTUGUÊS DA QUALIDADE (1996). NP EN 196-2 – Métodos de ensaio de cimentos. Parte 2: Análise química dos cimentos. Lisboa.

IPQ (2001). NP EN 197-1 – *Cimento. Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes*. Lisboa.

IPQ (2007). NP EN 206-1 – *Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade*. Lisboa.

IPQ (2012). NP EN 450 - 1 – *Cinzas volantes para betão. Parte 1: Definição, especificações e critérios de conformidade*. Lisboa.

IPQ (2006). NP EN 450 - 2 – *Cinzas volantes para betão. Parte 2: Avaliação da conformidade*. Lisboa.

IPQ (2011). NP EN 459 – *Cal de construção. Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade*. Lisboa.

IPQ (2000). NP EN 933 – *Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica – Método de peneiração*. Lisboa.

IPQ (2002). NP EN 1097-3 – *Ensaaios para a determinação das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 3: Método para determinação da baridade e dos vazios*. Lisboa.

- IPQ NP 4220 (2010) – *Pozolanas para betão, argamassa e caldas. Definições, requisitos e verificação da conformidade*. Maio, Lisboa.
- IYER, R. S.; SCOTT, J.A. (2001) – *Power station fly ash – a review of value-added utilization outside of the construction industry*. Resources Conservation and Recycling 31 (pág. 217- 228).
- MATEUS, Ricardo (2004) – *Novas tecnologias construtivas com vista à sustentabilidade da construção*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Universidade do Minho.
- MARTINS, João; ASSUNÇÃO, Joaquim S. (2010) – *Argamassas e Rebocos*. Materiais de Construção, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Fernando Pessoa.
- MESQUITA, Ana (2005) – *Modelos gaussianos de primeira e segunda geração: um caso de estudo*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro.
- PAIVA, H.; VELOSA, A.; VEIGA, R.; FERREIRA, V. (2010) – *Effect of maturation time on the fresh and hardened properties of an air lime mortar*. Cement and Concrete Research 40 (pág. 447- 451).
- PAPAYIANNI, Ioanna; STEFANIDOU, Maria (2006) – *Strength- porosity relationships in lime- pozzolan mortars*. Construction and Building Materials 20 (pág. 700-705).
- PAVÃO, João (2010) – *Estudo da influência da dosagem de ligante no desempenho de rebocos para edifícios antigos*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- PAULO, Raquel (2006) – *Caracterização das argamassas industriais*. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro, Universidade de Aveiro.
- PENAS, Filipa (2008) – *Argamassas de cal hidráulica para revestimentos de paredes*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- PEREIRA, Manuel (2010); AGUIAR, José; CAMÕES, Aires; CRUZ, Hélder – *Caracterização de argamassas para assentamento de alvenaria de tijolo*. Comunicações a conferências nacionais, Escola de Engenharia, Universidade do Minho.
- PEREIRA, Tiago (2008) – *Optimização das características de humedecimento e secagem de argamassas*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- PINHO, Fernando F. S. (2007) – *Paredes de alvenaria ordinária. Estudo experimental com modelos simples e reforçados*. Dissertação de mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologias Universidade Nova, Lisboa.
- PINHO, Fernando F. S. (2008) – *Paredes de edifícios antigos em Portugal*. Coleção Edifícios nº8, 2ª Edição, LNEC, Lisboa.
- PINHO, Fernando F. S. (2013) – *Utilização de agregados provenientes de “RCD” e cinzas volantes não-conformes em argamassas não estruturais*. Investigação recente na FCT/UNL. 2º Congresso Internacional da Habitação no Espaço Lusófono e 1º Congresso Construção e

---

Reabilitação de Edifícios no Espaço Lusófono, 13-15 Março, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

PINTO, J.; PEREIRA, H.; VILELA, P.; JACINTO, C.; VIEIRA, J. PAIVA, A.; PEREIRA, S.; FERREIRA, J.; CUNHA, V.; VARUM H. (2012) – *Camada de regularização com agregado de granulado de caroço da espiga de milho*. 4º Congresso Português de Argamassas e ETICS, Coimbra.

PONTES, Jorge (2011) – *Reactividade de pozolanas para argamassas e betões*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

RATO, Vasco (2006) – *Influência da microestrutura morfológica no comportamento das argamassas*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

REN (2012) – website:

<http://www.centrodeinformacao.ren.pt/PT/InformacaoTecnica/Paginas/CentraisTermoelectricas.aspx>, em Março de 2013.

SABEDOT, Sydney; SUNDSTRON, Marcelo; BOER, Sabrine; SAMPAIO, Carlos; DIAS, Rosane; RAMOS, Claudete (2011) – *Caracterização e aproveitamento de cinzas da combustão de carvão mineral geradas em usinas termoeléctricas*. 3º Congresso Brasileiro de Carvão Mineral. Rede de Carvão. Brazil.

SANTOS, Inês (2009a) – *Argamassas de revestimento para paredes de edifícios antigos com incorporação de adições pozolânicas*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.

SANTOS, Sérgio (2009b) – *Argamassas pré-doseadas para rebocos de edifícios recentes*. Dissertação de Mestrado, Academia Militar, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.

SEABRA, M.; PAIVA, H.; LABRINCHA, J. ; FERREIRA, V. (2007) – *Efeito dos adjuvantes no comportamento reológico de argamassas de cal aérea*. 2º Congresso Nacional de argamassas de construção, “Sob a égide da reabilitação”, Associação Portuguesa dos Fabricantes de Argamassas de Construção, Lisboa.

SIQUEIRA, Jacilene (2011) – *Reciclagem de resíduo a partir de cinzas de carvão mineral: produção de argamassas*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará.

SOUSA-COUTINHO, António (1988) – *Fabrico e propriedades do betão*. Volume I, 2ª Edição, LNEC.

SOUSA-COUTINHO, Joana (2006). *Ciência dos materiais*. 1ª Parte – documento provisório. Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, website:

<http://paginas.fe.up.pt/~jcouti/ligantes2006.pdf>, Novembro 2012.

TEJOENERGIA (n.d.) – website: <http://www.tejoenergia.com/index.asp?art=81>, em Agosto de 2013.

TEJOENERGIA (2011) – website:

[http://www.tejoenergia.com/filecont/sumario\\_ambiental2011\\_baixa\\_F.pdf](http://www.tejoenergia.com/filecont/sumario_ambiental2011_baixa_F.pdf), em Março de 2013

TORGAL, Pacheco; JALALI, Said (2007) – *Construção sustentável. O caso dos materiais de construção*. 3º Congresso Nacional Construção, 17 a 19 de Dezembro, Universidade de Coimbra.

UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA (UNL) / DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL (DEC) (1996a) – *Pedras naturais e artificiais. Determinação da massa volúmica*. Fe 01, Monte da Caparica, DEC UNL/FCT.

UNL/DEC (1996b) – *Pedras naturais e artificiais. Determinação da porosidade aberta*. Fe 02, Monte da Caparica, DEC UNL/FCT.

UNL/DEC (1999a) – *Pedras naturais e artificiais. Determinação da absorção de água por capilaridade*. Fe 06, Monte da Caparica, DEC UNL/FCT.

UNL/DEC (1996c) – *Pedras naturais e artificiais. Determinação do índice de secagem*. Fe 07, Monte da Caparica, DEC UNL/FCT.

UNL/DEC (1996d) – *Pedras naturais e artificiais. Determinação do módulo de elasticidade dinâmico*. Fe 08, Monte da Caparica, DEC UNL/FCT.

UNL/DEC (1996e) – *Pedras naturais e artificiais. Determinação da baridade*. Fe 15, Monte da Caparica, DEC UNL/FCT.

UNL/DEC (1996f) – *Pedras naturais e artificiais. Preparação dos provetes*. Fe 19, Monte da Caparica, DEC UNL/FCT.

UNL/DEC (1996g) – *Pedras naturais e artificiais. Determinação da aderência*. Fe 21, Monte da Caparica, DEC UNL/FCT.

UNL/DEC (1998) – *Pedras naturais e artificiais. Determinação da consistência*. Fe 25, Monte da Caparica, DEC UNL/FCT.

UNL/DEC (1999b) – *Pedras naturais e artificiais. Determinação da resistência à flexão e compressão*. Fe 27, Monte da Caparica, DEC UNL/FCT.

VEIGA, Rosário; SOUZA, Regina (2004) – *Metodologia de avaliação da retracção livre das argamassas desde a sua moldagem*. Revista nº20 (pág. 45 - 56), Centro de Engenharia Civil, Universidade do Minho.

VELOSA, Ana (2006) – *Argamassas de cal com pozolanas para revestimento de paredes antigas*. Tese de Doutoramento, Secção Autónoma de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro.

World COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT (1987) – *Our Common Future (or the Brundtland Report)*. Oxford University Press.

## ANEXO

## RESULTADOS

### 1. Considerações iniciais

Neste anexo apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de caracterização física dos materiais (areia normalizada, cal aérea, cinzas volantes conformes e não conformes) utilizados na preparação das argamassas (A0 a A4) e da sua caracterização física e mecânica. Os resultados incluem valores individuais, média e desvio padrão.

### 2. Ensaio de caracterização física dos materiais das argamassas

#### *Análise granulométrica*

Na tabela I.1 indicam-se os resultados obtidos do ensaio da análise granulométrica realizado à areia normalizada.

Tabela I.1 – Análise granulométrica da areia normalizada

Peneiro		Massa retida		Acumulado [%]	
Nº	Malha [mm]	[g]	[%]	Passado	Retido
<b>4</b>	4,76	0,00	0,00	100,00	0,00
<b>8</b>	2,38	0,37	0,03	99,97	0,03
<b>16</b>	1,19	0,63	0,05	99,93	0,07
<b>30</b>	0,595	918,73	68,90	31,03	68,97
<b>50</b>	0,297	110,57	8,29	22,73	77,27
<b>100</b>	0,149	171,00	12,82	9,91	90,09
<b>200</b>	0,075	131,33	9,85	0,06	99,94
<b>Refugo</b>	-	0,80	0,06	0,00	100,00
<b>Total</b>		1333,43	100,00	-	-
<b>Dimensão máxima do agregado</b>			D = 1,19 mm		
<b>Dimensão mínima do agregado</b>			d = 0,075 mm		
<b>Módulo de Finura</b>			MF = 3,36		

### **Determinação da baridade**

Na tabela I.2 indicam-se os registos das três massas e os respectivos valores das baridades de cada material. A central do Pego forneceu-se dois sacos com cinzas volantes conformes e não conforme, por isso, optou-se por retirar duas amostras de um saco e uma amostra do outro saco.

Tabela I.2 – Ensaio de determinação da baridade

Material	Pesagens	Massa [Kg]	Baridades [Kg/m <sup>3</sup> ]		
			Individual	Média	Desvio padrão
Areia normalizada	1	1,2190	1625,33	1627,02	38,82
	2	1,1918	1589,07		
	3	1,2500	1666,67		
Cal aérea	1	0,2193	292,40	294,84	4,59
	2	0,2190	292,00		
	3	0,2251	300,13		
Cinzas volantes conformes	1 (saco 1)	0,7142	952,27	949,78	5,26
	2 (saco 1)	0,7150	953,33		
	3 (saco 2)	0,7078	943,73		
Cinzas volantes não conformes	1 (saco 1)	0,5704	760,53	772,62	11,75
	2 (saco 1)	0,5880	784,00		
	3 (saco 2)	0,5800	773,33		

## **3. Produção das argamassas**

### **3.1. Preparação das amassaduras**

Na tabela I.3 apresentam-se os resultados dos volumes e das massas de cada material utilizados na produção das argamassas.

Tabela I.3 – Determinação das massas de cada material

Argamassas	Volumes e massas							
	Cal aérea		Cinzas Volantes Conformes		Cinzas Volantes Não Conformes		Areia Normalizada	
	V [cm <sup>3</sup> ]	M [g]	V [cm <sup>3</sup> ]	M [g]	V [cm <sup>3</sup> ]	M [g]	V[cm <sup>3</sup> ]	M [g]
A0	1050	309,8	—	—	—	—	3150	5128,2
A1	875	258,1	175	166,3	—	—	3150	5128,2
A2	700	206,5	350	332,5	—	—	3150	5128,2
A3	875	258,1	—	—	175	135,4	3150	5128,2
A4	700	206,5	—	—	350	270,6	3150	5128,2

### **3.2. Ensaio de caracterização das argamassas no estado fresco: consistência por espalhamento**

Na tabela I.4 referem-se os valores obtidos do ensaio de consistência por espalhamento das argamassas, incluindo os valores dos quatros diâmetros medidos na mesa de consistência.

Tabela I.4 – Ensaio de consistência por espalhamento

Argamassas	Diâmetro [cm]					Espalhamento [%]
	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>	d <sub>4</sub>	d <sub>med</sub>	
A0	16,1	16,7	17,2	16,5	16,6	66,25
A1	17,3	17,1	17,6	17,7	17,4	74,25
A2	16,8	16,8	16,7	16,5	16,7	67,00
A3	17,2	17,4	17,1	17,5	17,3	73,00
A4	17,6	17,8	17,6	17,7	17,7	76,75

## 4. Ensaio de caracterização das argamassas no estado endurecido

### 4.1. Características físicas

#### Retracção

Na tabela I.5 apresentam-se os registos dos valores de retracção dos seis provetes das cinco argamassas durante 7 dias.

Tabela I.5 – Registos dos valores obtidos da retracção

Arg.	Nº	Datas													
		5 Abril		6 Abril		7 Abril		8 Abril		9 Abril		10 Abril		11 Abril	
		Lados													
		A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
A0	A0-1	0,1	0	0,1	0	0,1	0	0,1	0	0,1	0	0,1	0	0,1	0,01
	A0-2	0	0,1	0	0,1	0,01	0,1	0,01	0,1	0,01	0,1	0,01	0,1	0,01	0,1
	A0-3	0,1	0	0,1	0	0,1	0	0,1	0	0,1	0	0,1	0	0,1	0
	A0-4	0	0	0	0	0,01	0	0,01	0	0,01	0	0,01	0	0,01	0
	A0-5	0	0	0,01	0	0,01	0	0,01	0	0,01	0	0,01	0	0,01	0
	A0-6	0	0	0,01	0	0,01	0	0,01	0	0,01	0	0,01	0	0,01	0
A1	A1-1	0,01	0	0,01	0	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,1	0,01	0,1	0,1
	A1-2	0	0	0	0	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,1
	A1-3	0	0	0	0	0,1	0,01	0,1	0,01	0,1	0,01	0,1	0,01	0,1	0,1
	A1-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	A1-5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0	0,01	0	0,01
	A1-6	0	0,1	0	0,1	0	0,1	0	0,1	0	0,1	0	0,1	0	0,1
A2	A2-1	0	0,1	0	0,1	0	0,1	0	0,1	0,01	0,1	0,01	0,1	0,01	0,1
	A2-2	0,1	0	0,1	0	0,1	0,01	0,1	0,01	0,1	0,01	0,1	0,1	0,1	0,1
	A2-3	0	0	0	0	0	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,1	0,1	0,1	0,1
	A2-4	0,1	0	0,1	0	0,1	0,01	0,1	0,01	0,1	0,01	0,1	0,01	0,1	0,01
	A2-5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	A2-6	0	0,1	0	0,1	0,01	0,1	0,01	0,1	0,01	0,1	0,01	0,1	0,01	0,1
A3	A3-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	A3-2	0	0,1	0	0,1	0,01	0,1	0,01	0,1	0,01	0,1	0,01	0,1	0,01	0,1
	A3-3	0	0	0	0	0,01	0	0,01	0	0,01	0	0,1	0	0,1	0
	A3-4	0	0	0,01	0	0,01	0	0,01	0	0,01	0	0,01	0	0,01	0
	A3-5	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

Tabela I.5 – Registos dos valores obtidos da retacção (continuação)

Arg.	Nº	Datas													
		5 Abril		6 Abril		7 Abril		8 Abril		9 Abril		10 Abril		11 Abril	
		Lados													
		A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
A3	A3-6	0	0	0	0	0	0	0,01	0	0,01	0	0,01	0	0,01	0
A4	A4-1	0	0	0,01	0	0,01	0	0,01	0	0,01	0	0,1	0	0,1	0
	A4-2	0	0	0,01	0	0,01	0	0,01	0	0,01	0	0,1	0	0,1	0
	A4-3	0	0	0	0	0,01	0	0,01	0	0,01	0	0,01	0	0,1	0
	A4-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	A4-5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0	0,01
	A4-6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

**Absorção de água por capilaridade**

Os valores e os gráficos resultantes deste ensaio são apresentados separadamente em “meios provetes” e provetes inteiros e ainda segundo o tipo de argamassa, A0 a A4. Os resultados da quantidade de água absorvida dos “meios provetes” são indicados nas tabelas I.6, I.10, I.14, I.18 e I.22 e dos provetes inteiros são apresentados nas tabelas I.8, I.12, I.16, I.20 e I.24. As curvas de absorção de água por capilaridade dos “meios provetes” e a sua média são representadas nas figuras I.1, I.4, I.7, I.10 e I.13, dos provetes inteiros e a sua média são ilustrados nas figuras I.2, I.5, I.8, I.11 e I.14 e, por último, nas figuras I.3, I.6, I.9, I.12 e I.15 apresentam-se as médias dos três provetes (“meios provetes” e provetes inteiros) de cada tipo de argamassas e as respectivas médias. Os valores do coeficiente por capilaridade e do valor assintótico dos “meios provetes” são indicados nas tabelas I.7, I.11, I.15, I.19 e I.23 e dos provetes inteiros são apresentados nas tabelas I.9, I.13, I.17, I.21 e I.25.

Tabela I.6 – Registos das massas durante o ensaio e resultados da quantidade de água absorvida pelos provetes A0-1 a A0-3 (“meios provetes”)

Data	Tempo	Massa provetes [g]			Quantidade absorvida [kg/m <sup>2</sup> ]				
		[h]	[h <sup>1/2</sup> ]	A0-1	A0-2	A0-3	Individuais		
Ensaio							A0-1	A0-2	A0-3
<b>6-Jul</b>	t=0min	0	0	295,33	242,46	270,74	0,00	0,00	0,00
	t=5min	0,08	0,29	305,14	253,04	282,57	6,13	6,62	7,40
	t=10mi	0,17	0,41	308,25	256,31	286,12	8,07	8,66	9,61
	t=15mi	0,25	0,50	310,65	258,80	288,75	9,57	10,22	11,26
	t=30mi	0,5	0,71	315,80	263,99	294,14	12,79	13,46	14,63
	t=1hor	1	1	321,90	264,14	295,28	16,60	13,56	15,34
	t=3hor	3	1,73	322,44	264,66	295,82	16,94	13,88	15,68
	t=6hor	6	2,45	322,52	265,42	296,13	16,99	14,35	15,87
<b>7-Jul</b>	1 dia	24	4,90	323,29	265,54	296,56	17,47	14,43	16,14
<b>8-Jul</b>	2 dias	48	6,93	323,97	265,53	297,74	17,89	14,42	16,88
<b>9-Jul</b>	3 dias	72	8,49	324,18	266,68	297,74	18,03	15,14	16,88
<b>10-Jul</b>	4 dias	96	9,80	324,41	266,91	297,99	18,17	15,29	17,03



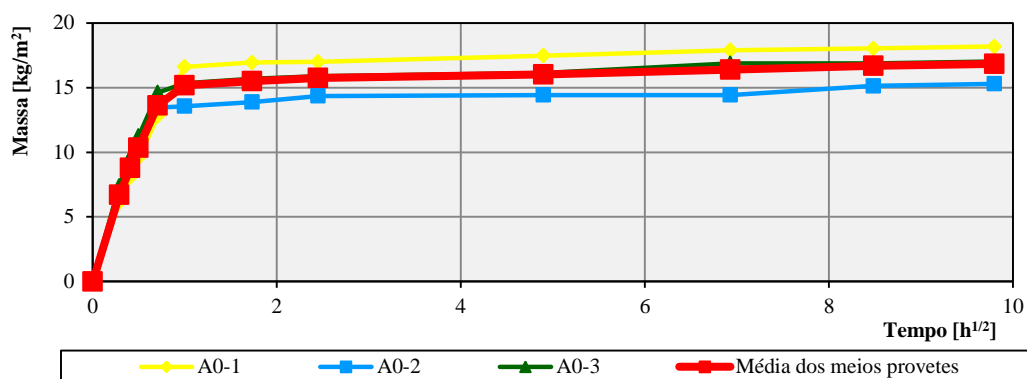


Figura I.1 – Curvas de absorção de água por capilaridade dos provetes A0-1 a A0-3 (“meios provetes”)

Tabela I.7 – Resultados do coeficiente de capilaridade dos provetes A0-1 a A0-3 (“meios provetes”)

Provetes	Coeficiente de capilaridade [kg/m <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> ]
A0-1	14,74
A0-2	9,99
A0-3	11,33
Média	12,02
Desvio Padrão	2,45

Tabela I.8 – Registos das massas durante o ensaio e resultados da quantidade de água absorvida pelos provetes A0-4 a A0-6 (provetes inteiros)

Data	Tempo		Massa provetes [g]			Quantidade absorvida [kg/m <sup>2</sup> ]			
						Individuais			Média
Ensaio	[h]	[h <sup>1/2</sup> ]	A0-4	A0-5	A0-6	A0-4	A0-5	A0-6	A0-4a A0-6
5-Jul	t=0min	0	465,41	466,81	472,27	0,00	0,00	0,00	0,00
	t=5min	0,0	475,78	475,45	481,50	6,48	5,40	5,77	5,88
	t=10min	0,1	478,69	478,27	484,46	8,30	7,16	7,62	7,69
	t=15min	0,2	480,90	480,25	486,56	9,68	8,40	8,93	9,00
	t=30min	0,5	485,64	485,14	491,41	12,64	11,46	11,96	12,02
	t=1hora	1	492,25	491,18	497,55	16,77	15,23	15,80	15,93
	t=3horas	3	506,24	506,18	512,55	25,52	24,61	25,18	25,10
	t=6horas	6	507,65	507,55	514,53	26,40	25,47	26,41	26,09
6-Jul	1dia	24	508,49	508,48	515,17	26,92	26,04	26,81	26,59
7-Jul	2 dias	48	509,66	509,79	516,84	27,65	26,86	27,85	27,46
8-Jul	3 dias	72	510,1	510,81	517,27	27,92	27,51	28,12	27,85
9-Jul	4 dias	96	510,54	510,93	517,23	28,20	27,58	28,10	27,96
10-Jul	5dias	120	510,59	510,99	517,30	28,23	27,61	28,15	28,00

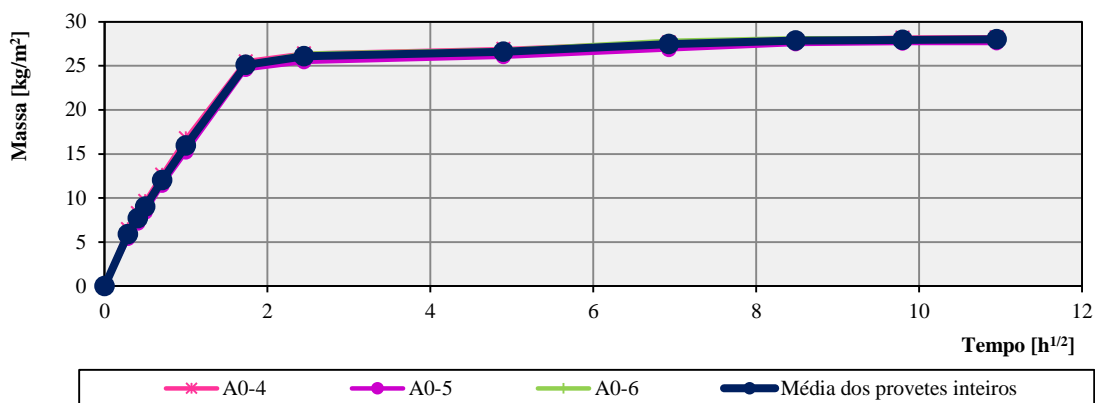
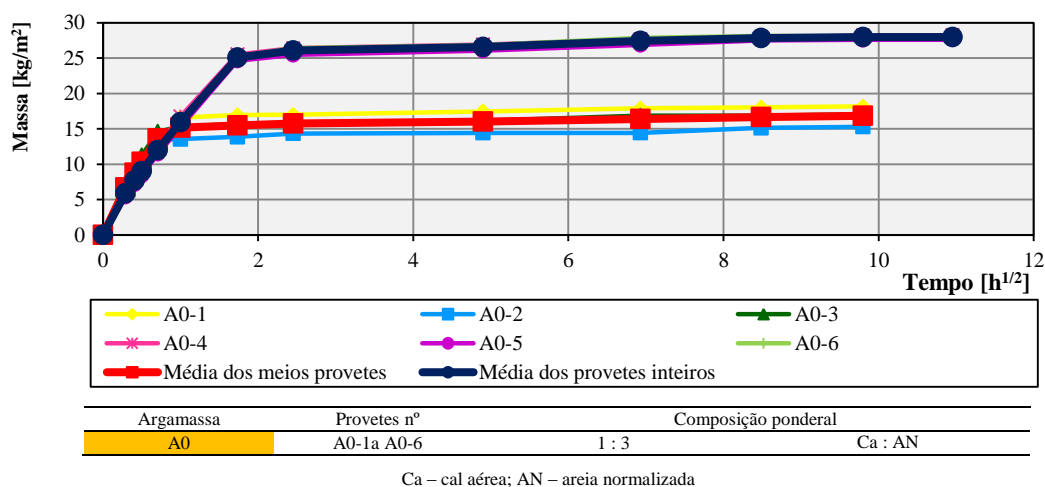


Figura I.2 – Curvas de absorção de água por capilaridade dos provetes A0-4 a A0-6 (provetes inteiros)

Tabela I.9 – Resultados do coeficiente de capilaridade e do valor assintótico dos provetes A0-4 a A0-6 (provetes inteiros)

Provetes	Coeficiente de capilaridade [kg/m².h¹/²]	Valor assintótico [kg/m²]
A0-4	14,43	28,23
A0-5	13,85	27,61
A0-6	14,09	28,15
Média	14,12	28,00
Desvio Padrão	0,29	0,34



Argamassa	Provetes nº	Composição ponderal
A0	A0-1a A0-6	1 : 3 Ca : AN

Ca – cal aérea; AN – areia normalizada

Figura I.3 – Curvas de absorção de água por capilaridade dos provetes A0-1 a A0-6

Tabela I.10 – Registos das massas durante o ensaio e resultados da quantidade de água absorvida pelos provetes A1-1 a A1-3 (“meios provetes”)

Data	Tempo		Massa provetes [g]			Quantidade absorvida [kg/m²]			
	Ensaio	[h]	[h¹/²]	A1-1	A1-2	A1-3	A1-1	A1-2	A1-3
6-Jul	t=0min	0	0	232,98	241,34	250,03	0,00	0,00	0,00
	t=5min	0,08	0,29	238,78	246,97	256,40	3,62	3,52	3,98
	t=10min	0,17	0,41	240,98	248,62	258,50	5,00	4,55	5,29
	t=15min	0,25	0,50	242,43	250,28	259,98	5,91	5,58	6,22
	t=30min	0,50	0,71	245,84	253,38	263,13	8,04	7,52	8,19

Tabela I.10 – Registos das massas durante o ensaio e resultados da quantidade de água absorvida pelos provetes A1-1 a A1-3 (“meios provetes”) (continuação)

Data	Tempo		Massa provetes [g]			Quantidade absorvida [kg/m2]				
Ensaio	[h]	[h <sup>1/2</sup> ]	A1-1	A1-2	A1-3	A1-1	A1-2	A1-3	Individuais Média	
6-Jul	t=1hora	1	1	250,10	257,54	267,52	10,70	10,13	10,93	A1-1aA1-3 10,59
	t=3horas	3	1,73	251,67	260,85	270,12	11,68	12,19	12,56	12,14
	t=6horas	6	2,45	251,74	260,10	270,14	11,73	12,29	12,57	12,20
7-Jul	1dia	24	4,90	251,87	261,10	270,23	11,81	12,35	12,64	12,27
8-Jul	2dias	48	6,93	252,41	261,85	270,43	12,14	12,82	12,75	12,57
9-Jul	3dias	72	8,49	252,92	262,60	271,76	12,46	13,29	13,58	13,11
10-Jul	4dias	96	9,80	252,94	262,62	271,80	12,48	13,30	13,61	13,13

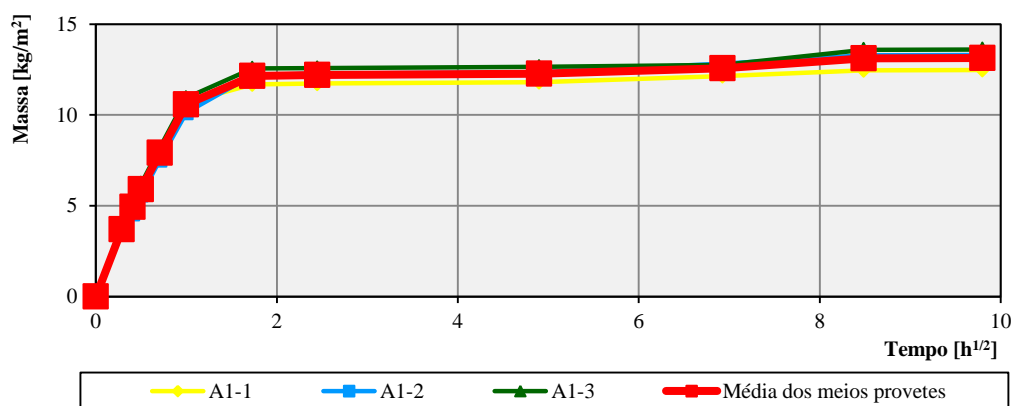


Figura I.4 – Curva de absorção de água por capilaridade dos provetes A1-1 a A1-3 (“meios provetes”)

Tabela I.11 – Resultados do coeficiente de capilaridade dos provetes A1-1 a A1-3 (“meios provetes”)

Provetes	Coeficiente de capilaridade[kg/m <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> ]
A1-1	9,90
A1-2	9,36
A1-3	9,70
Média	9,65
Desvio Padrão	0,28

Tabela I.12 – Registos das massas durante o ensaio e resultados da quantidade de água absorvida pelos provetes A1-4 a A1-6 (provetes inteiros)

Data	Tempo		Massa provetes [g]			Quantidade absorvida [kg/m <sup>2</sup> ]				
	Ensaio	[h]	[h <sup>1/2</sup> ]	A1-4	A1-5	A1-6	Individuais			Média
5-Jul	t=0min	0	0	490,08	486,16	492,14	A1-4	A1-5	A1-6	A1-4aA1-6
	t=5min	0,08	0,29	494,32	491,16	497,19	2,65	3,12	3,16	2,98
	t=10min	0,17	0,41	495,94	492,92	498,98	3,66	4,22	4,27	4,05
	t=15min	0,25	0,50	497,22	494,13	500,42	4,46	4,98	5,17	4,87
	t=30min	0,50	0,71	500,34	497,16	503,58	6,41	6,87	7,15	6,81
	t=1hora	1	1	504,08	500,98	507,77	8,75	9,26	9,76	9,26

Tabela I.12 – Registos das massas durante o ensaio e resultados da quantidade de água absorvida pelos provetes A1-4 a A1-6 (provetes inteiros) (continuação)

Data	Tempo	Massa provetes [g]					Quantidade absorvida [kg/m <sup>2</sup> ]			
							Individuais			Média
Ensaio	[h]	[h <sup>1/2</sup> ]	A1-4	A1-5	A1-6	A1-4	A1-5	A1-6	A1-4aA1-6	
5-Jul	t=3horas	3	1,73	514,64	511,56	518,99	15,35	15,88	16,78	16,00
	t=6horas	6	2,45	522,20	518,58	526,76	20,08	20,26	21,64	20,66
6-Jul	1dia	24	4,90	528,860	524,53	530,86	24,24	23,98	24,20	24,14
7-Jul	2dias	48	6,93	529,348	526,04	532,27	24,54	24,93	25,08	24,85
8-Jul	3dias	72	8,49	530,545	526,51	532,57	25,29	25,22	25,27	25,26
9-Jul	4dias	96	9,80	531,203	527,138	533,28	25,70	25,61	25,71	25,67
10-Jul	5dias	120	10,95	531,278	527,22	533,33	25,75	25,66	25,75	25,72

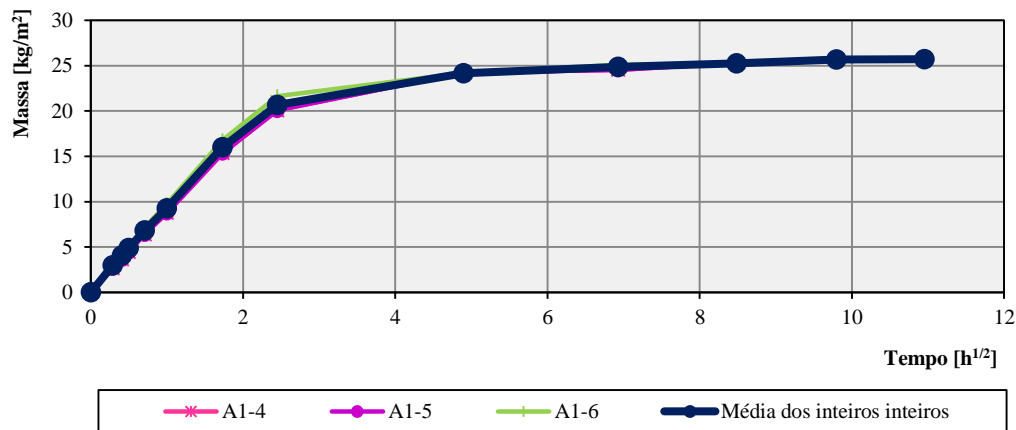
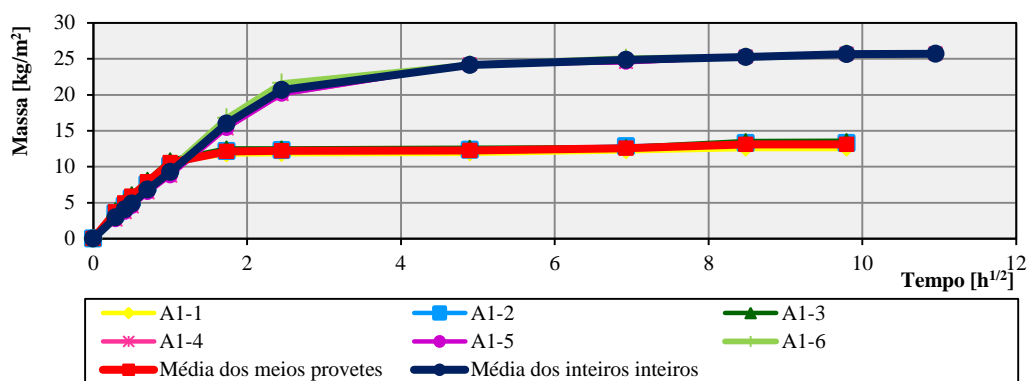


Figura I.5 – Curvas de absorção de água por capilaridade dos provetes A1-4 a A1-6 (provetes inteiros)

Tabela I.13 – Resultados do coeficiente de capilaridade e do valor assintótico dos provetes A1-4 a A1-6 (provetes inteiros)

Provetes	Coeficiente de capilaridade [kg/m <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> ]	Valor assintótico [kg/m <sup>2</sup> ]
A1-4	8,65	25,75
A1-5	8,63	25,66
A1-6	9,32	25,75
Média	8,9	25,72
Desvio Padrão	0,39	0,05



Argamassa	Provetes nº	Composição ponderal
A1	A1-1a A1-6	1 : 0,2 : 3,6 Ca : CVC : AN

Ca – cal aérea; CVC – cinzas volantes conformes; AN – areia normalizada

Figura I.6 – Curvas de absorção de água por capilaridade dos provetes A1-1 a A1- 6

Tabela I.14 – Registos das massas durante o ensaio e resultados da quantidade de água absorvida pelos provetes A2-1 a A2-3 (“meios provetes”)

Data	Tempo		Massa provetes [g]			Quantidade absorvida [kg/m²]			
	Ensaio	[h]	[h <sup>1/2</sup> ]	A2-1	A2-2	A2-3	Individuais		
							A2-1	A2-2	A2-3
6-Jul	t=0min	0	0	259,83	241,57	251,04	0,00	0,00	0,00
	t=5min	0,08	0,29	266,18	247,17	256,28	3,97	3,50	3,27
	t=10min	0,17	0,41	268,51	249,38	258,35	5,42	4,88	4,57
	t=15min	0,25	0,50	270,01	250,84	259,92	6,36	5,79	5,55
	t=30min	0,50	0,71	273,45	254,13	263,32	8,51	7,85	7,68
	t=1hora	1	1	278,18	258,50	267,88	11,47	10,58	10,53
	t=3horas	3	1,73	280,05	260,42	270,16	12,64	11,78	11,95
	t=6horas	6	2,45	280,10	260,47	270,21	12,67	11,81	11,98
7-Jul	1dia	24	4,90	280,25	260,70	270,41	12,76	11,95	12,11
8-Jul	2dias	48	6,93	281,62	261,37	271,76	13,62	12,37	12,95
9-Jul	3dias	72	8,49	282,12	262,60	272,23	13,93	13,14	13,24
10-Jul	4dias	96	9,80	282,16	262,64	272,26	13,96	13,16	13,26

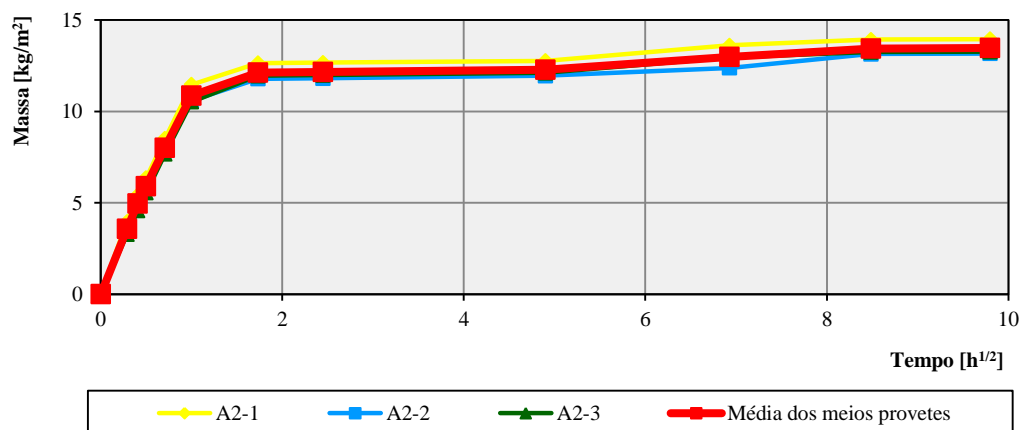


Figura I.7 – Curvas de absorção de água por capilaridade dos provetes A2-1 a A2-3 (“meios provetes”)

Tabela I.15 – Resultados do coeficiente de capilaridade dos provetes A2-1 a A2-3 (“meios provetes”)

Provetes	Coeficiente de capilaridade [ $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ ]
A2-1	10,44
A2-2	9,88
A2-3	10,17
Média	10,17
Desvio Padrão	0,28

Tabela I.16 – Registos das massas durante o ensaio e resultados da quantidade de água absorvida pelos provetes A2-4 a A2-6 (provetes inteiros)

Data	Tempo	Massa provetes [g]				Quantidade absorvida [ $\text{kg/m}^2$ ]			
		[h]	[ $\text{h}^{1/2}$ ]	A2-4	A2-5	A2-6	Individuais		
Ensaio							A2-4	A2-5	A2-6
5-Jul	t=0min	0	0	498,58	504,38	504,96	498,582	0,000	0,000
	t=5min	0,08	0,29	502,56	509,09	509,65	502,558	2,94	2,93
	t=10min	0,17	0,41	504,39	510,92	511,59	504,393	4,09	4,14
	t=15min	0,25	0,50	505,71	512,32	512,95	505,713	4,96	4,99
	t=30min	0,50	0,71	508,78	515,53	516,26	508,780	6,97	7,06
	t=1hora	1	1,0	512,74	519,59	520,470	512,744	9,50	9,69
	t=3horas	3	1,73	523,54	527,34	531,94	523,535	14,35	16,86
	t=6horas	6	2,45	531,30	538,73	539,84	531,296	21,47	21,80
6-Jul	1dia	24	4,90	536,515	542,18	542,88	536,515	23,62	23,70
7-Jul	2dias	48	6,93	536,934	542,58	543,28	536,934	23,88	23,95
8-Jul	3dias	72	8,49	538,264	543,93	544,57	538,264	24,72	24,75
9-Jul	4dias	96	9,80	539,109	544,80	545,40	539,109	25,26	25,28
10-Jul	5dias	120	10,95	539,189	544,84	545,48	539,189	25,29	25,33

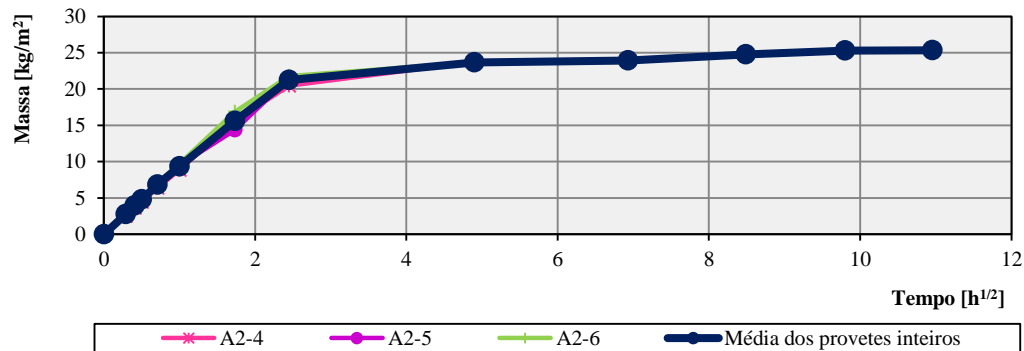


Figura I.8 – Curvas de absorção de água por capilaridade dos provetes A2-4 a A2-6 (provetes inteiros)

Tabela I.17 – Resultados do coeficiente de capilaridade e do valor assintótico dos provetes A2-4 a A2-6 (provetes inteiros)

Provetes	Coeficiente de capilaridade [ $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ ]	Valor assintótico [ $\text{kg/m}^2$ ]
A2-4	8,94	25,38
A2-5	9,25	25,29
A2-6	9,51	25,33
Média	9,24	25,33
Desvio Padrão	0,29	0,05

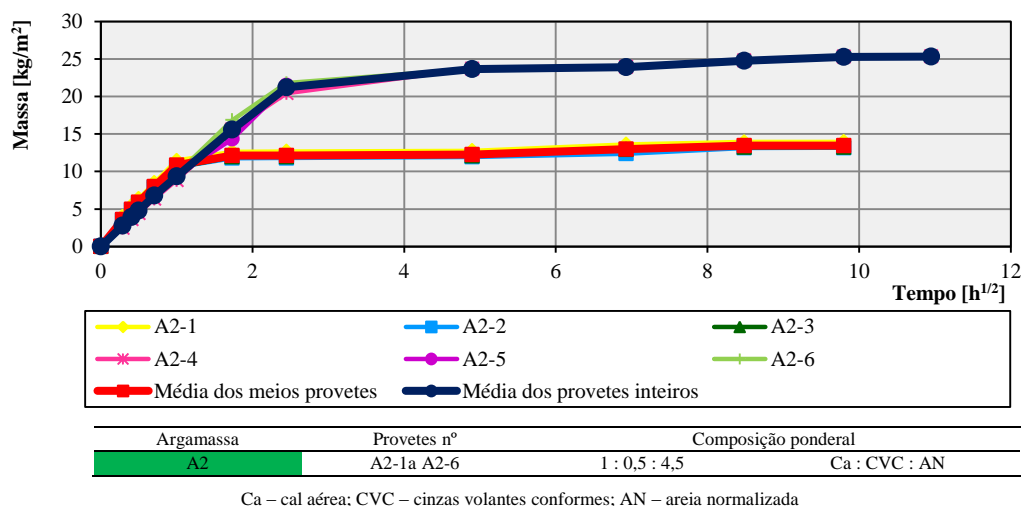


Figura I.9 – Curvas de absorção de água por capilaridade dos provetes A2-1 a A2-6

Tabela I.18 – Registos das massas durante o ensaio e resultados da quantidade de água absorvida pelos provetes A3-1 a A3-3 (“meios provetes”)

Data	Tempo		Massa provetes [g]			Quantidade absorvida [kg/m²]			
	Ensaio	[h]	[h¹/²]	A3-1	A3-2	A3-3	A3-1	A3-1	A3-3
6-Jul	t=0min	0	0	258,414	243,366	294,012	0,00	0,00	0,00
	t=5min	0,08	0,29	265,600	250,541	301,299	4,49	4,48	4,55
	t=10min	0,17	0,41	268,042	253,300	303,951	6,02	6,21	6,21
	t=15min	0,25	0,50	269,962	255,111	305,776	7,22	7,34	7,35
	t=30min	0,50	0,71	274,145	259,159	309,878	9,83	9,87	9,92
	t=1hora	1	1,0	280,345	263,951	314,157	13,71	12,87	12,59
	t=3hras	3	1,73	283,403	264,927	319,246	15,62	13,48	15,77
	t=6horas	6	2,45	284,440	265,185	319,346	16,27	13,64	15,83
7-Jul	1dia	24	4,90	285,696	265,396	320,530	17,05	13,77	16,57
8-Jul	2dias	48	6,93	286,689	265,708	321,038	17,67	13,96	16,89
9-Jul	3dias	72	8,49	286,925	266,035	321,540	17,82	14,17	17,21
10-Jul	4dias	96	9,80	286,952	266,061	321,888	17,84	14,18	17,42

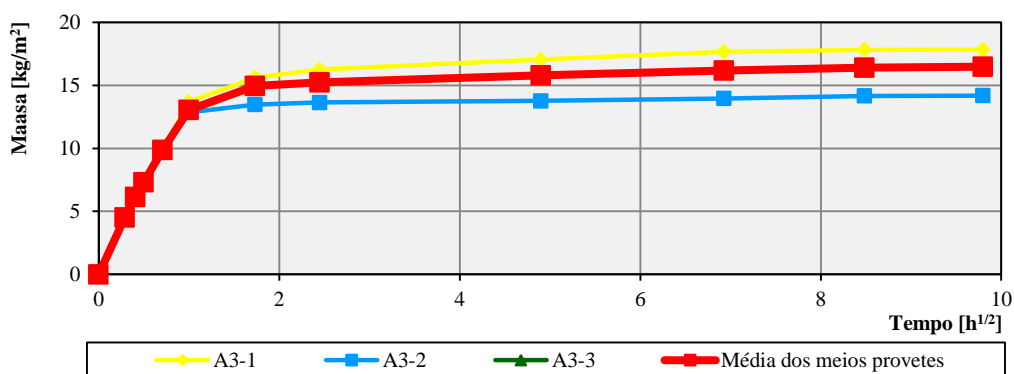


Figura I.10 – Curvas de absorção de água por capilaridade dos provetes A3-1 a A3-3 (“meios provetes”)

Tabela I.19 – Resultados do coeficiente de capilaridade dos provetes A3-1 a A3-3 (“meios provetes”)

Provetes	Coeficiente de capilaridade [ $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ ]
A3-1	12,94
A3-2	11,70
A3-3	11,28
Média	11,97
Desvio Padrão	0,86

Tabela I.20 – Registos das massas durante o ensaio e resultados da quantidade de água absorvida pelos provetes A3-4 a A3-6 (provetes inteiros)

Data	Tempo		Massa provetes [g]			Quantidade absorvida [ $\text{kg/m}^2$ ]			
	Ensaio	[h]	[ $\text{h}^{1/2}$ ]	A3-4	A3-5	A3-6	Individuais	Média	
5-Jul	t=0min	0	0	480,91	486,73	485,45	0,00	0,00	0,00
	t=5min	0,08	0,29	488,11	493,12	491,91	4,50	4,00	4,2
	t=10min	0,17	0,41	490,75	495,58	494,55	6,15	5,53	5,8
	t=15min	0,25	0,5	492,63	497,36	496,27	7,32	6,65	6,9
	t=30min	0,5	0,71	497,42	501,28	500,50	10,32	9,10	9,6
	t=1hora	1	1	503,03	506,81	506,36	13,82	12,55	13,1
	t=3horas	3	1,73	517,69	521,89	522,02	22,99	21,98	22,6
	t=6horas	6	2,45	522,19	528,11	527,06	25,80	25,87	25,9
6-Jul	1dia	24	4,90	522,77	529,57	527,67	26,16	26,78	26,4
7-Jul	2dias	48	6,93	524,13	530,95	529,60	27,01	27,64	27,4
8-Jul	3dias	72	8,49	524,53	530,72	530,16	27,26	27,50	27,6
9-Jul	4dias	96	9,80	525,36	531,12	530,44	27,78	27,75	27,9
10-Jul	5dias	120	9,80	525,45	531,18	530,5	27,83	27,78	28,15

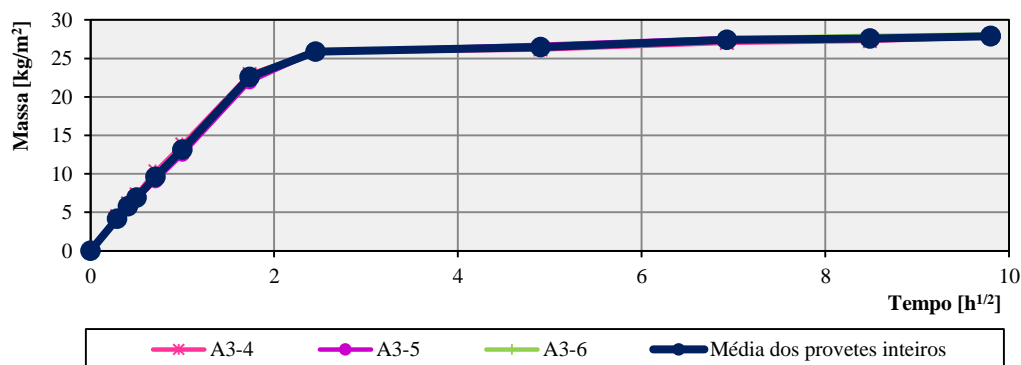


Figura I.11 – Curvas de absorção de água por capilaridade dos provetes A3-4 a A3-6 (provetes inteiros)

Tabela I.21 – Resultados do coeficiente de capilaridade e do valor assintótico dos provetes A3-4 a A3-6 (provetes inteiros)

Provetes	Coeficiente de capilaridade [ $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ ]	Valor assintótico [ $\text{kg/m}^2$ ]
A3-4	13,18	27,83
A3-5	11,97	27,78
A3-6	12,63	28,15
Média	12,59	27,92
Desvio Padrão	0,60	0,20



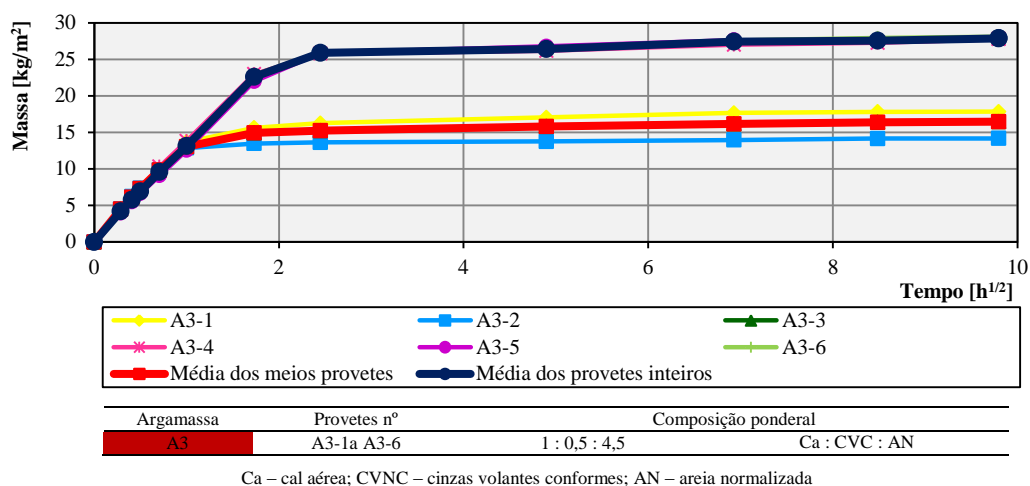


Figura I.12 – Curvas de absorção de água por capilaridade dos provetes A3-1 a A3-6

Tabela I.22 – Registos das massas durante o ensaio e resultados da quantidade de água absorvida pelos provetes A4-1 a A4-3 (“meios provetes”)

Data	Tempo		Massa provetes [g]			Quantidade absorvida [kg/m²]			
	Ensaio	[h]	[h <sup>1/2</sup> ]	A4-1	A4-2	A4-3	Individuais		
							A4-1	A4-2	A4-3
6-Jul	t=0min	0	0	250,77	248,13	234,40	0,00	0,00	0,00
	t=5min	0,08	0,29	255,40	253,05	239,48	2,89	3,07	3,18
	t=10min	0,17	0,41	257,13	254,80	241,32	3,97	4,17	4,33
	t=15min	0,25	0,50	258,52	256,19	242,72	4,84	5,04	5,20
	t=30min	0,50	0,71	261,28	259,20	243,70	6,57	6,92	5,81
	t=1hora	1	1,0	265,27	263,43	249,89	9,06	9,57	9,68
	t=3horas	3	1,73	269,76	267,31	252,51	11,87	11,99	11,32
	t=6horas	6	2,45	270,90	268,38	253,42	12,58	12,66	11,89
7-Jul	1dia	24	4,90	271,19	268,75	253,91	12,76	12,89	12,20
8-Jul	2dias	48	6,93	271,64	269,77	254,57	13,04	13,53	12,61
9-Jul	3dias	72	8,49	272,45	270,31	255,36	13,55	13,86	13,10
10-Jul	4dias	96	9,80	272,48	270,34	255,39	13,57	13,88	13,12

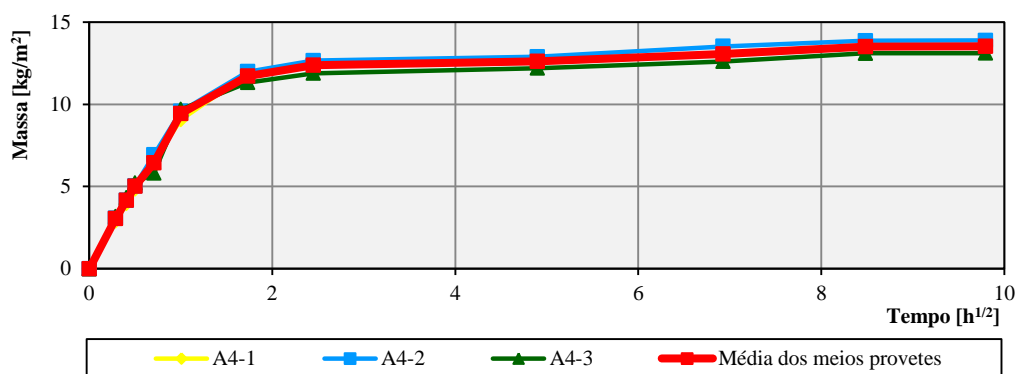


Figura I.13 – Curvas de absorção de água por capilaridade dos provetes A4-1 a A4-3 (“meios provetes”)

Tabela I.23 – Resultados do coeficiente de capilaridade dos provetes A4-1 a A4-3 (“meios provetes”)

Provetes	Coeficiente de capilaridade [ $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ ]
A4-1	8,64
A4-2	9,12
A4-3	8,61
Média	8,79
Desvio Padrão	0,29

Tabela I.24 – Registos das massas durante o ensaio e resultados da quantidade de água absorvida pelos provetes A4-4 a A4-6 (provetes inteiros)

Data	Tempo			Massa provetes [g]			Quantidade absorvida [ $\text{kg/m}^2$ ]			
				A4-4	A4-5	A4-6	Individuais			Média
Ensaio	[h]	[ $\text{h}^{1/2}$ ]					A4-4	A4-5	A4-6	A4-4aA4-6
5-Jul	0 min	0	0	498,55	494,90	495,68	0,00	0,00	0,00	0,00
	5 min	0,08	0,29	502,94	499,11	500,10	2,75	2,63	2,77	2,71
	10 min	0,17	0,41	504,82	501,03	501,88	3,92	3,83	3,87	3,87
	15min	0,25	0,5	506,20	502,41	503,11	4,78	4,69	4,65	4,71
	30 min	0,5	0,71	509,23	505,58	506,17	6,68	6,67	6,56	6,63
	1 hora	1	1	513,65	510,06	510,43	9,44	9,47	9,22	9,38
	3 horas	3	1,73	526,65	522,29	522,35	17,56	17,11	16,67	17,11
	6 horas	6	2,45	534,59	531,05	530,91	22,52	22,59	22,02	22,38
6-Jul	1dia	24	4,90	539,54	535,28	536,44	25,62	25,23	25,48	25,44
7-Jul	2dias	48	6,93	540,26	536,10	537,06	26,07	25,75	25,87	25,89
8-Jul	3dias	72	8,49	540,89	537,65	537,38	26,46	26,71	26,07	26,41
9-Jul	4dias	96	9,80	541,40	538,20	538,15	26,78	27,05	26,55	26,79
10-Jul	5dias	120	9,80	541,46	538,26	538,15	26,82	27,09	26,55	26,82

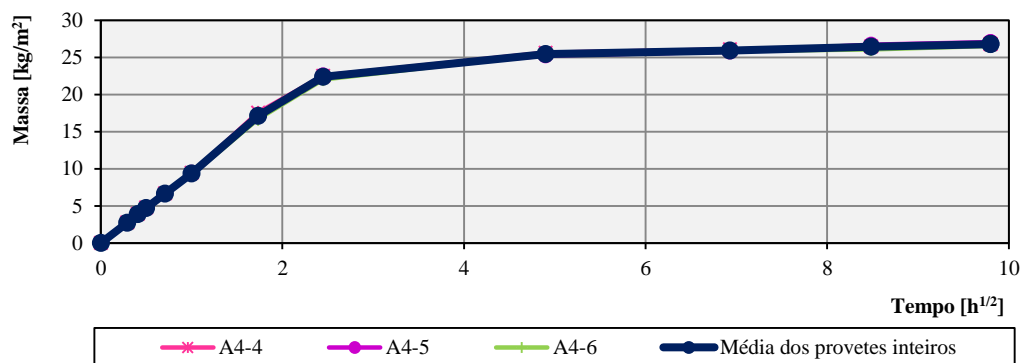


Figura I.14 – Curvas de absorção de água por capilaridade dos provetes A4-4 a A4-6 (provetes inteiros)

Tabela I.25 – Resultados do coeficiente de capilaridade e do valor assintótico dos provetes A4-4 a A4-6 (provetes inteiros)

Provetes	Coeficiente de capilaridade [ $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ ]	Valor assintótico [ $\text{kg/m}^2$ ]
A4-4	9,37	26,82
A4-5	9,59	27,09
A4-6	9,06	26,55
Média	9,34	26,82
Desvio Padrão	0,27	0,27

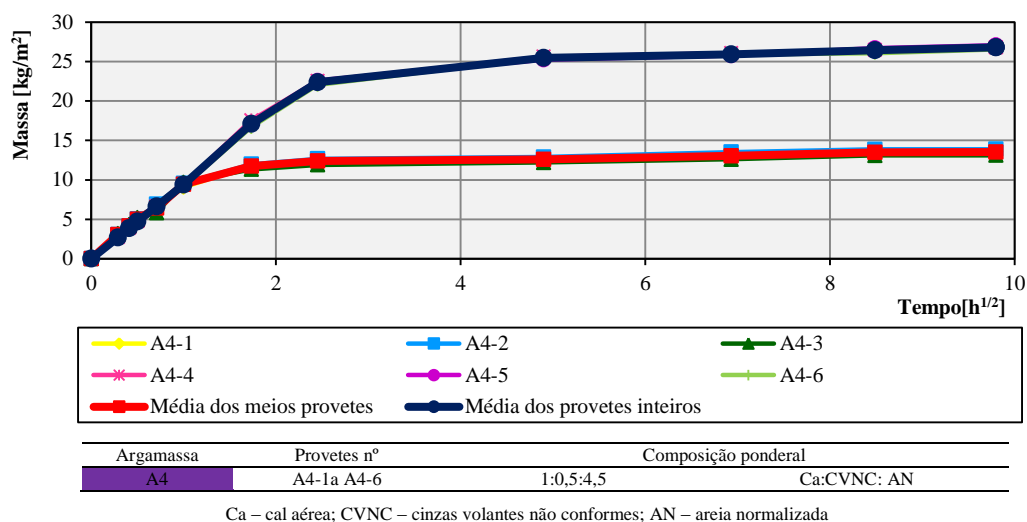


Figura I.15 – Curvas de absorção de água por capilaridade dos provetes A4-1 a A4-6

### Secagem

Os valores e os gráficos resultantes deste ensaio são apresentados separadamente em “meios provetes” e provetes inteiros e ainda segundo o tipo de argamassa, A0 a A4. Os resultados do teor de água dos “meios provetes” são indicados nas tabelas I.26, I.32, I.38, I.44 e I.50 e dos provetes inteiros são apresentados nas tabelas I.29, I.35, I.41, I.47 e I.53. As curvas de secagem dos “meios provetes” e a sua média são representadas nas figuras I.16, I.19, I.22, I.25 e I.28, dos provetes inteiros e a sua média são ilustrados nas figuras I.17, I.20, I.23, I.26 e I.29 e, por último, nas figuras I.18, I.21, I.24, I.27 e I.30 apresentam-se as médias dos três provetes (“meios provetes” e provetes inteiros) de cada tipo de argamassas e as respectivas médias. Os valores da taxa de secagem dos “meios provetes” são indicados nas tabelas I.27, I.33, I.39, I.45 e I.51 e dos provetes inteiros são apresentados nas tabelas I.30, I.36, I.42, I.48 e I.54. Os valores do índice de secagem são indicados nas tabelas I.28, I.34, I.40, I.46 e I.52 e dos provetes inteiros são representados nas tabelas I.31, I.37, I.43, I.49 e I.55.

Tabela I.26 – Registos das massas durante o ensaio e resultados do teor de água dos provetes A0-1 a A0-3 (“meios provetes”)

Data	Tempo	Massa provetes, Mi [g]	Teor de água, Qi [%]						
			Individuais			Média			
Ensaio	[horas]	A0-1	A0-2	A0-3	A0-1	A0-2	A0-3	A0-1aA0-3	
10-Jul	0 min	0	324,408	266,914	297,986	9,84	10,09	10,07	10,00
	5 min	0,08	324,176	266,636	297,666	9,77	9,97	9,95	9,90
	10 min	0,17	324,122	266,562	297,400	9,75	9,94	9,85	9,85
	15min	0,25	323,747	266,227	297,016	9,62	9,81	9,71	9,71
	30 min	0,50	322,053	265,631	296,308	9,05	9,56	9,45	9,35
	1 hora	1	321,686	264,506	294,932	8,92	9,10	8,94	8,99
	3 horas	3	319,949	263,015	293,178	8,33	8,48	8,29	8,37
	6 horas	6	318,811	262,124	292,114	7,95	8,11	7,90	7,99

Tabela I.26 – Registos das massas durante o ensaio e resultados do teor de água dos provetes A0-1 a A0-3 (“meios provetes”) (continuação)

Data	Tempo	Massa provetes, Mi [g]	Teor de água, Qi [%]						
			Individuais						Média
Ensaio	[horas]	A0-1	A0-2	A0-3	A0-1	A0-2	A0-3	A0-1aA0-3	
11-Jul	1dia	24	317,507	261,028	290,744	7,51	7,66	7,39	7,52
12-Jul	2dias	48	315,727	259,555	287,914	6,91	7,05	6,35	6,77
13-Jul	3dias	72	297,074	243,991	272,19	0,59	0,63	0,54	0,59
14-Jul	4dias	96	295,871	243,883	271,14	0,18	0,59	0,15	0,31
15-Jul	5dias	120	295,710	243,289	271,10	0,13	0,35	0,13	0,20
16-Jul	6dias	144	295,699	242,990	271,08	0,12	0,22	0,13	0,16
17-Jul	7dias	168	295,689	242,980	271,08	0,12	0,22	0,13	0,16

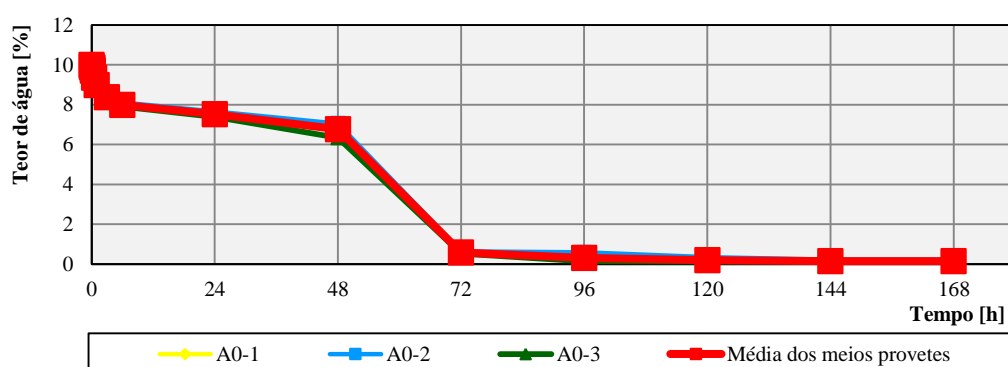


Figura I.16 – Curvas de secagem dos provetes A0-1 a A0-3 (“meios provetes”)

Tabela I.27 – Resultados da taxa de secagem dos provetes A0-1 a A0-3 (“meios provetes”)

Provetes	Taxa de secagem [kg/m <sup>2</sup> .h]
A0-1	1,018
A0-2	0,990
A0-3	1,117
Média	1,042
Desvio Padrão	0,066

Tabela I.28 – Resultados do índice de secagem dos provetes A0-1 a A0-3 (“meios provetes”)

Tempo [horas]	Provetes					
	A0-1		A0-2		A0-3	
	Qi	A <sub>i</sub> <sup>(1)</sup>	Qi	A <sub>i</sub> <sup>(1)</sup>	Qi	A <sub>i</sub> <sup>(1)</sup>
0	9,84	-	10,09	-	10,07	-
0,08	9,77	0,82	9,97	0,84	9,95	0,83
0,17	9,75	0,81	9,94	0,83	9,85	0,82
0,25	9,62	0,81	9,81	0,82	9,71	0,81
0,50	9,05	2,33	9,56	2,42	9,45	2,39
1	8,92	4,49	9,10	4,66	8,94	4,60
3	8,33	17,26	8,48	17,58	8,29	17,23
6	7,95	24,43	8,11	24,89	7,90	24,28
24	7,51	139,12	7,66	141,98	7,39	137,59

Tabela I.28 – Resultados do índice de secagem dos provetes A0-1 a A0-3 (“meios provetes”) (continuação)

Tempo [horas]	Provetes					
	A0-1		A0-2		A0-3	
	Qi	A <sub>i</sub> <sup>(1)</sup>	Qi	A <sub>i</sub> <sup>(1)</sup>	Qi	A <sub>i</sub> <sup>(1)</sup>
48	6,91	172,96	7,05	176,59	6,35	164,83
72	0,59	89,94	0,63	92,27	0,54	82,58
96	0,18	9,26	0,59	14,70	0,15	8,24
120	0,13	3,72	0,35	11,23	0,13	3,42
144	0,12	3,02	0,22	6,81	0,13	3,15
168	0,12	2,93	0,22	5,28	0,13	3,06
Somatório	-	471,90	-	500,89	-	453,82
Área Total			1680			
Índice de Secagem	Índiv.	0,28	0,30		0,27	
	Média		0,283			
	DP		0,014			

$$^{(1)} A_i = \frac{Q_i + Q_{i+2}}{2} \times (t_{i+1} - t_i)$$

Tabela I.29 – Registos das massas durante o ensaio e resultados do teor de água dos provetes A0-4 a A0-6 (provetes inteiros)

Data	Tempo	Tempo [horas]	Massa provetes, Mi [g]			Teor de água, Qi [%]			
			A0-4	A0-5	A0-6	Individuais		Média	
<b>11-Jul</b>	<b>Ensaio</b>					A0-4	A0-5	A0-6	A0-4aA0-6
	0 min	0	510,585	510,985	517,303	9,71	9,46	9,54	9,6
	5 min	0,08	510,094	510,493	517,250	9,60	9,36	9,52	9,5
	10 min	0,17	509,658	510,037	516,814	9,51	9,26	9,43	9,4
	15min	0,25	509,003	509,358	516,115	9,37	9,12	9,28	9,3
	30 min	0,50	507,825	508,225	514,896	9,11	8,87	9,03	9,0
	1 hora	1	505,511	505,879	512,425	8,62	8,37	8,50	8,5
	3 horas	3	502,556	502,926	509,288	7,98	7,74	7,84	7,9
	6 horas	6	500,745	501,158	507,495	7,59	7,36	7,46	7,5
<b>12-Jul</b>	1dia	24	498,463	498,982	505,163	7,10	6,89	6,96	7,0
<b>13-Jul</b>	2dias	48	495,423	496,061	502,077	6,45	6,27	6,31	6,3
<b>14-Jul</b>	3dias	72	470,229	479,324	490,820	1,03	2,68	3,93	2,5
<b>15-Jul</b>	4dias	96	467,187	468,704	474,621	0,38	0,41	0,50	0,4
<b>16-Jul</b>	5dias	120	465,400	466,320	472,590	0,00	-0,10	0,07	0,0
<b>17-Jul</b>	6dias	144	465,200	466,020	472,450	-0,05	-0,17	0,04	-0,1
<b>18-Jul</b>	7dias	168	465,160	465,990	472,420	-0,05	-0,17	0,03	-0,1

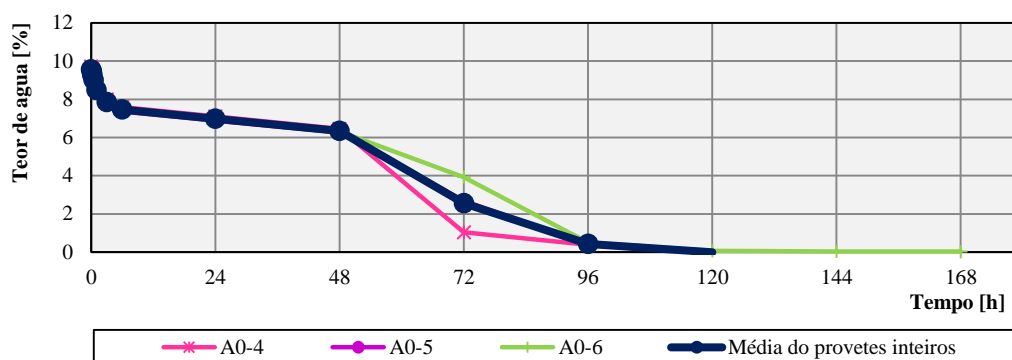


Figura I.17 – Curvas de secagem dos provetes A0-4 a A0-6 (provetes inteiros)

Tabela I.30 – Resultados da taxa de secagem dos provetes A0-4 a A0-6 (provetes inteiros)

Provetes	Taxa de secagem [kg/m <sup>2</sup> .h]
A0-4	1,084
A0-5	1,085
A0-6	1,076
Média	1,082
Desvio Padrão	0,005

Tabela I.31 – Resultados do índice de secagem dos provetes A0-4 a A0-6 (provetes inteiros)

Tempo [horas]	Provetes					
	A0-4		A0-5		A0-6	
	Qi	Ai <sup>(1)</sup>	Qi	Ai <sup>(1)</sup>	Qi	Ai <sup>(1)</sup>
0	9,71	-	9,46	-	9,54	-
0,08	9,60	0,80	9,36	0,78	9,52	0,79
0,17	9,51	0,80	9,26	0,78	9,43	0,79
0,25	9,37	0,79	9,12	0,77	9,28	0,78
0,50	9,11	2,31	8,87	2,25	9,03	2,29
1	8,62	4,43	8,37	4,31	8,50	4,38
3	7,98	16,60	7,74	16,11	7,84	16,34
6	7,59	23,36	7,36	22,65	7,46	22,95
24	7,10	132,24	6,89	128,27	6,96	129,81
48	6,45	162,60	6,27	157,92	6,31	159,32
72	1,03	89,80	2,68	107,39	3,93	122,87
96	0,38	17,00	0,41	37,06	0,50	53,11
120	0,00	4,55	-0,10	3,63	0,07	6,79
144	-0,05	-0,58	-0,17	-3,26	0,04	1,27
168	-0,05	-1,20	-0,17	-4,11	0,03	0,84
Somatório	-	453,49	-	474,54		522,32
Área Total	1680					
Índice de Secagem	Indiv.	0,27	0,28		0,31	
	Média		0,288			
	DP		0,021			

$$^{(1)} A_i = \frac{Q_i + Q_{i+2}}{2} \times (t_{i+1} - t_i)$$

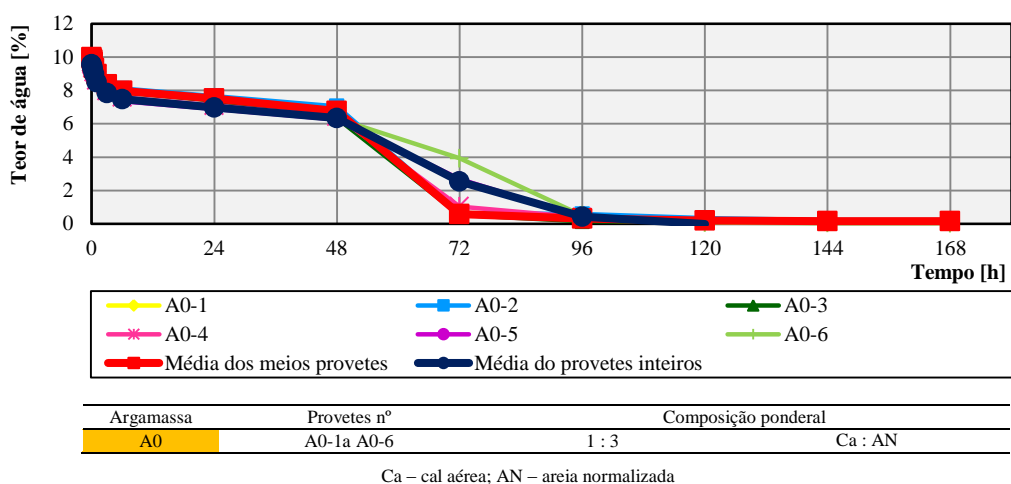


Figura I.18 – Curvas de secagem dos provetes A0-1 a A0-6

Tabela I.32 – Registos das massas durante o ensaio de secagem e resultados do teor de água dos provetes A1-1 a A1-3 (“meios provetes”)

Data	Tempo	Massa provetes, Mi [g]			Teor de água, Qi [%]			
					Individuais			Média
Ensaio	[horas]	A1-1	A1-2	A1-3	A1-1	A1-2	A1-3	A1-1aA1-3
10-Jul	0 min	252,941	262,615	271,801	8,57	8,81	8,71	8,7
	5 min	252,895	262,402	271,525	8,55	8,73	8,60	8,6
	10 min	252,872	262,240	271,371	8,54	8,66	8,54	8,6
	15min	252,595	261,990	270,513	8,42	8,56	8,19	8,4
	30 min	252,133	261,494	270,285	8,22	8,35	8,10	8,2
	1 hora	251,288	260,660	269,744	7,86	8,00	7,89	7,9
	3 horas	250,090	259,683	268,666	7,34	7,60	7,45	7,5
	6 horas	249,502	259,124	268,013	7,09	7,37	7,19	7,2
11-Jul	1 dia	248,729	258,365	267,139	6,76	7,05	6,84	6,9
12-Jul	2 dias	247,725	257,364	265,988	6,33	6,64	6,38	6,5
13-Jul	3 dias	240,123	249,345	254,897	3,07	3,32	1,95	2,8
14-Jul	4 dias	234,980	243,85	252,84	0,86	1,04	1,13	1,0
15-Jul	5 dias	233,390	241,970	250,780	0,18	0,26	0,30	0,2
16-Jul	6 dias	233,180	241,890	250,700	0,09	0,23	0,27	0,2
17-Jul	7 dias	233,170	241,880	250,690	0,08	0,22	0,26	0,2

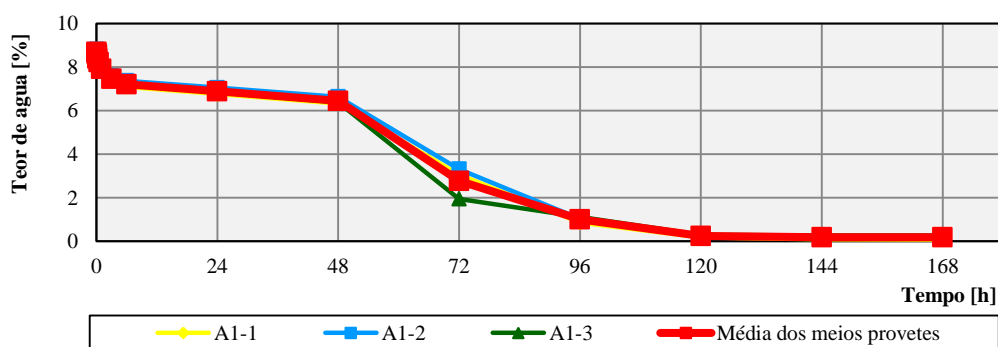


Figura I.19 – Curvas de secagem dos provetes A1-1 a A1-3 (“meios provetes”)

Tabela I.33 – Resultados da taxa de secagem dos provetes A1-1 a A1-3 (“meios provetes”)

Provetes	Taxa de secagem [kg/m <sup>2</sup> .h]
A1-1	0,747
A1-2	0,805
A1-3	0,809
Média	0,787
Desvio Padrão	0,035

Tabela I.34 – Resultados do índice de secagem dos provetes A1-1 a A1-3 (“meios provetes”)

Tempo [horas]	Provetes					
	A1-1		A1-2		A1-3	
	Qi	Ai <sup>(1)</sup>	Qi	Ai <sup>(1)</sup>	Qi	Ai <sup>(1)</sup>
0	8,57	-	8,81	-	8,71	-
0,08	8,55	0,71	8,73	0,73	8,60	0,72
0,17	8,54	0,71	8,66	0,72	8,54	0,71
0,25	8,42	0,71	8,56	0,72	8,19	0,70
0,50	8,22	2,08	8,35	2,11	8,10	2,04
1	7,86	4,02	8,00	4,09	7,89	4,00
3	7,34	15,20	7,60	15,60	7,45	15,34
6	7,09	21,66	7,37	22,45	7,19	21,97
24	6,76	124,68	7,05	129,80	6,84	126,33
48	6,33	157,09	6,64	164,32	6,38	158,72
72	3,07	112,76	3,32	119,47	1,95	99,97
96	0,86	47,11	1,04	52,26	1,13	36,88
120	0,18	12,43	0,26	15,59	0,30	17,12
144	0,09	3,16	0,23	5,86	0,27	6,83
168	0,08	2,03	0,22	5,41	0,26	6,40
Somatório	-	504,36	-	539,14	-	497,74
Área Total	1680					
Índice de Secagem	Indiv.	0,30	0,32		0,30	
	Média		0,306			
	DP		0,013			

$$^{(1)} A_i = \frac{Q_i + Q_{i+2}}{2} \times (t_{i+1} - t_i)$$

Tabela I.35 – Registos das massas durante o ensaio de secagem e resultados do teor de água dos provetes A1-4 a A1-6 (provetes inteiros)

Data	Tempo	Massa provetes, Mi [g]	Teor de água, Qi [%]						
			Individuais			Média			
Ensaio	[horas]	A1-4	A1-5	A1-6	A1-4	A1-5	A1-6	A1-4aA1-6	
11-Jul	0 min	0	531,278	527,215	533,334	8,41	8,44	8,37	8,4
	5 min	0,08	530,886	526,749	532,957	8,33	8,35	8,29	8,3
	10 min	0,17	530,474	526,319	532,504	8,24	8,26	8,20	8,2
	15min	0,25	529,930	525,710	531,831	8,13	8,13	8,06	8,1
	30 min	0,50	528,995	524,662	530,664	7,94	7,92	7,83	7,9
	1 hora	1	527,230	522,592	528,228	7,58	7,49	7,33	7,5
	3 horas	3	524,933	520,100	525,361	7,11	6,98	6,75	6,9
	6 horas	6	523,594	518,766	523,955	6,84	6,71	6,46	6,7



Tabela I.35 – Registos das massas durante o ensaio de secagem e resultados do teor de água dos provetes A1-4 a A1-6 (provetes inteiros) (continuação)

Data	Tempo	[horas]	Massa provetes, Mi [g]			Teor de água, Qi [%]			
			A1-4	A1-5	A1-6	Individuais			Média
Ensaio						A1-4	A1-5	A1-6	A1-4aA1-6
12-Jul	1dia	24	521,879	517,068	521,904	6,49	6,36	6,05	6,3
13-Jul	2dias	48	519,587	514,811	518,125	6,02	5,89	5,28	5,7
14-Jul	3dias	72	500,243	499,263	501,231	2,07	2,69	1,85	2,2
15-Jul	4dias	96	497,242	497,823	495,998	1,46	2,40	0,78	1,5
16-Jul	5dias	120	492,790	491,263	492,890	0,55	1,05	0,15	0,6
17-Jul	6dias	144	492,670	487,480	492,800	0,53	0,27	0,13	0,3
18-Jul	7dias	168	492,660	487,470	492,790	0,53	0,27	0,13	0,3

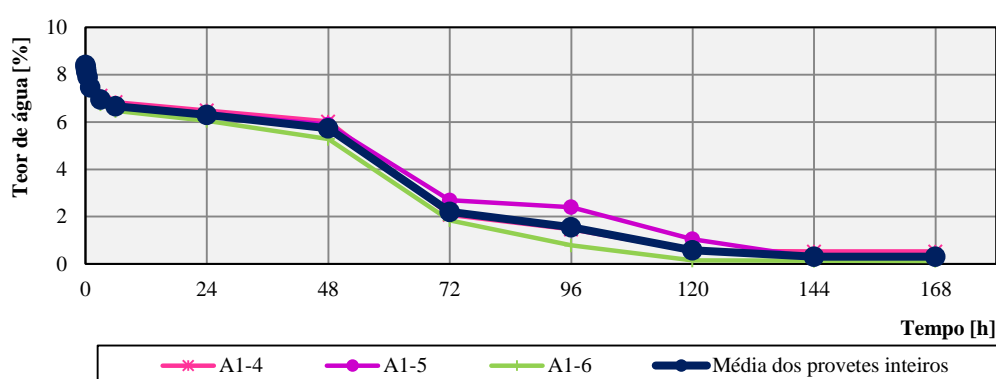


Figura I.20 – Curvas de secagem dos provetes A1-4 a A1-6 (provetes inteiros)

Tabela I.36 – Resultados da taxa de secagem dos provetes A1-4 a A1-6 (provetes inteiros)

Provetes	Taxa de secagem [kg/m <sup>2</sup> .h]
A1-4	0,820
A1-5	0,942
A1-6	1,042
Média	0,935
Desvio Padrão	0,111

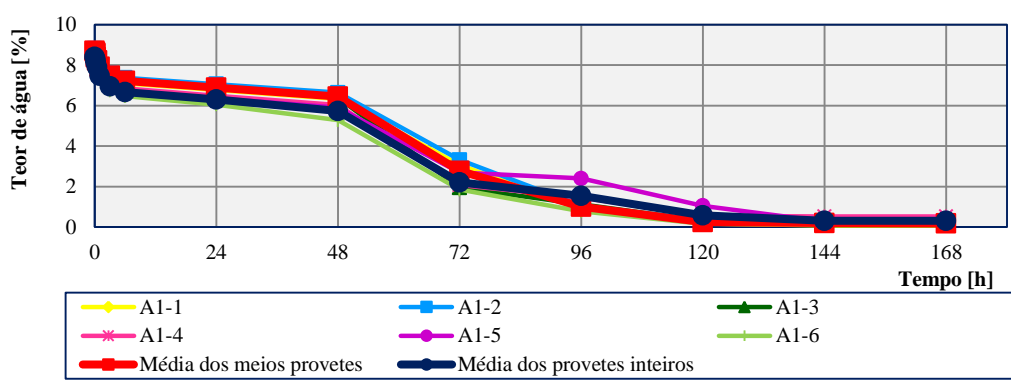
Tabela I.37 – Resultados do índice de secagem dos provetes A1-4 a A1-6 (provetes inteiros)

Tempo [horas]	Provetes					
	A1-4		A1-5		A1-6	
	Qi	Ai <sup>(1)</sup>	Qi	Ai <sup>(1)</sup>	Qi	Ai <sup>(1)</sup>
0	8,41	-	8,44	-	8,37	-
0,08	8,33	0,70	8,35	0,70	8,29	0,69
0,17	8,24	0,69	8,26	0,69	8,20	0,69
0,25	8,13	0,68	8,13	0,68	8,06	0,68
0,50	7,94	2,01	7,92	2,01	7,83	1,99
1	7,58	3,88	7,49	3,85	7,33	3,79
3	7,11	14,69	6,98	14,47	6,75	14,08
6	6,84	20,93	6,71	20,53	6,46	19,82
24	6,49	119,95	6,36	117,57	6,05	112,61
48	6,02	150,12	5,89	147,00	5,28	135,93

Tabela I.37 – Resultados do índice de secagem dos provetes A1-4 a A1-6 (provetes inteiros) (continuação)

Tempo [horas]	Provetes					
	A1-4		A1-4		A1-4	
	Qi	Ai <sup>(1)</sup>	Qi	Qi	Ai <sup>(1)</sup>	Qi
72	2,07	97,15	2,69	103,05	1,85	85,52
96	1,46	42,43	2,40	61,12	0,78	31,57
120	0,55	24,18	1,05	41,37	0,15	11,23
144	0,53	12,99	0,27	15,84	0,13	3,43
168	0,53	12,67	0,27	6,48	0,13	3,19
Somatório	-	503,07	-	535,38	-	425,22
Área Total	1680					
Índice de Secagem	Indiv.	0,30	0,32	0,25		
	Média		0,290			
	DP		0,034			

$$^{(1)} A_i = \frac{Q_i + Q_{i+2}}{2} \times (t_{i+1} - t_i)$$



Argamassa	Provetes nº	Composição ponderal
A1	A1-1a A1-6	1: 0,2 : 3,6 Ca : CVC : AN

Ca – cal aérea; CVC – cinzas volantes conformes; AN – areia normalizada

Figura I.21 – Curvas de secagem dos provetes A1-1 a A1-6

Tabela I.38 – Registos das massas durante o ensaio e resultados do teor de água dos provetes A2-1a A2-3 (“meios provetes”)

Data	Tempo [horas]	Massa provetes, Mi [g]			Teor de água, Qi [%]			
		A2-1	A2-2	A2-3	Individuais	A2-1	A2-2	A2-3
10-Jul	Ensaio							
	0 min	0	282,162	262,636	272,262	8,59	8,72	8,45
	5 min	0,08	281,842	262,341	272,025	8,47	8,60	8,36
	10 min	0,17	281,685	262,191	271,973	8,41	8,53	8,34
	15min	0,25	281,386	261,948	271,835	8,30	8,43	8,28
	30 min	0,50	280,819	261,446	271,522	8,08	8,23	8,16
	1 hora	1	279,805	260,680	270,788	7,69	7,91	7,87
	3 horas	3	278,629	259,811	270,321	7,23	7,55	7,68
11-Jul	6 horas	6	277,950	259,317	269,651	6,97	7,35	7,41
	1dia	24	277,054	258,675	268,832	6,63	7,08	7,09
	2dias	48	270,916	250,858	260,422	4,27	3,84	3,74
	3dias	72	261,699	248,345	255,412	0,72	2,80	1,74
	4dias	96	260,438	243,834	254,792	0,23	0,94	1,49
	5dias	120	259,970	242,100	251,370	0,05	0,22	0,13
	6dias	144	259,800	242,040	251,340	-0,01	0,19	0,12
	7dias	168	259,770	242,010	251,330	-0,02	0,18	0,12

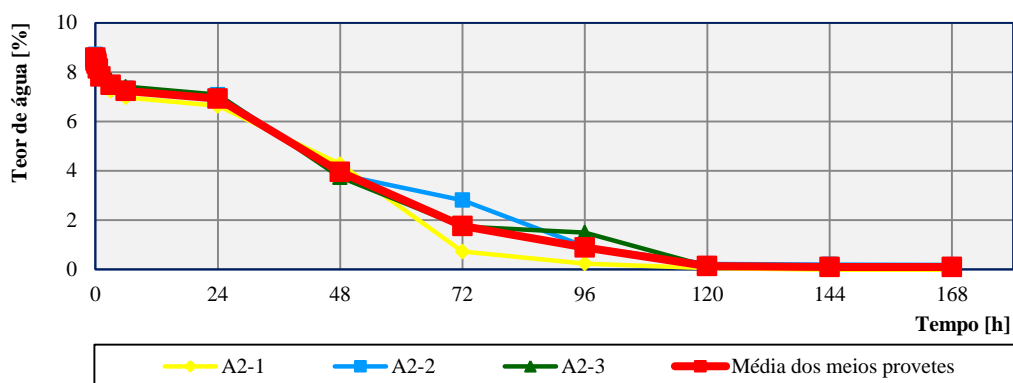


Figura I.22 – Curvas de secagem dos provetes A2-1 a A2-3 (“meios provetes”)

Tabela I.39 – Resultados da taxa de secagem dos provetes A2-1 a A2-3 (“meios provetes”)

Provetes	Taxa de secagem [kg/m <sup>2</sup> .h]
A2-1	0,888
A2-2	0,789
A2-3	0,564
Média	0,559
Desvio Padrão	0,160

Tabela I.40 – Resultados do índice de secagem dos provetes A2-1 a A2-3 (“meios provetes”)

Tempo [horas]	Provetes					
	A2-1		A2-2		A2-3	
	Qi	Ai <sup>(1)</sup>	Qi	Ai <sup>(1)</sup>	Qi	Ai <sup>(1)</sup>
0	8,59	-	8,72	-	8,45	-
0,08	8,47	0,71	8,60	0,72	8,36	0,70
0,17	8,41	0,70	8,53	0,71	8,34	0,70
0,25	8,30	0,70	8,43	0,71	8,28	0,69
0,50	8,08	2,05	8,23	2,08	8,16	2,06
1	7,69	3,94	7,91	4,03	7,87	4,01
3	7,23	14,92	7,55	15,46	7,68	15,55
6	6,97	21,31	7,35	22,34	7,41	22,64
24	6,63	122,41	7,08	129,82	7,09	130,51
48	4,27	130,73	3,84	131,08	3,74	129,89
72	0,72	59,81	2,80	79,76	1,74	65,75
96	0,23	11,42	0,94	44,87	1,49	38,83
120	0,05	3,44	0,22	13,85	0,13	19,51
144	-0,01	0,49	0,19	4,94	0,12	3,01
168	-0,02	-0,43	0,18	4,49	0,12	2,82
Somatório	-	372,19	-	454,87	-	436,66
Área Total			1680			
Índice de Secagem	Índiv.	0,22		0,27		0,26
	Média	0,251				
	DP	0,026				

$$^{(1)} A_i = \frac{Q_i + Q_{i+2}}{2} \times (t_{i+1} - t_i)$$

Tabela I.41 – Registos das massas durante o ensaio de secagem e resultado do teor de água dos provetes  
A2-4 a A2-6 (provetes inteiros)

Data	Tempo		Massa provetes, Mi [g]			Teor de água, Qi [%]			
	Ensaio	[horas]	A2-4	A2-5	A2-6	A2-4	A2-5	A2-6	A2-4aA2-6
11-Jul	0 min	0	539,189	544,841	545,483	8,14	8,02	8,02	8,1
	5 min	0,08	538,967	544,570	545,214	8,10	7,97	7,97	8,0
	10 min	0,17	538,850	544,369	544,963	8,08	7,93	7,92	8,0
	15min	0,25	538,507	543,998	544,498	8,01	7,85	7,83	7,9
	30 min	0,50	537,767	543,047	543,396	7,86	7,67	7,61	7,7
	1 hora	1	535,976	540,098	541,225	7,50	7,08	7,18	7,3
	3 horas	3	534,916	540,050	540,151	7,29	7,07	6,97	7,1
	6 horas	6	533,573	538,845	538,604	7,02	6,83	6,66	6,8
12-Jul	1dia	24	531,736	536,045	536,430	6,65	6,28	6,23	6,4
13-Jul	2dias	48	530,840	528,013	535,172	6,47	4,69	5,98	5,7
14-Jul	3dias	72	526,138	514,013	509,151	5,53	1,91	0,83	2,8
15-Jul	4dias	96	510,507	509,127	506,394	2,39	0,94	0,28	1,2
16-Jul	5dias	120	505,430	508,940	506,140	1,37	0,90	0,23	0,8
17-Jul	6dias	144	500,390	505,870	506,050	0,36	0,30	0,22	0,3
18-Jul	7dias	168	500,370	505,850	506,030	0,36	0,29	0,21	0,3

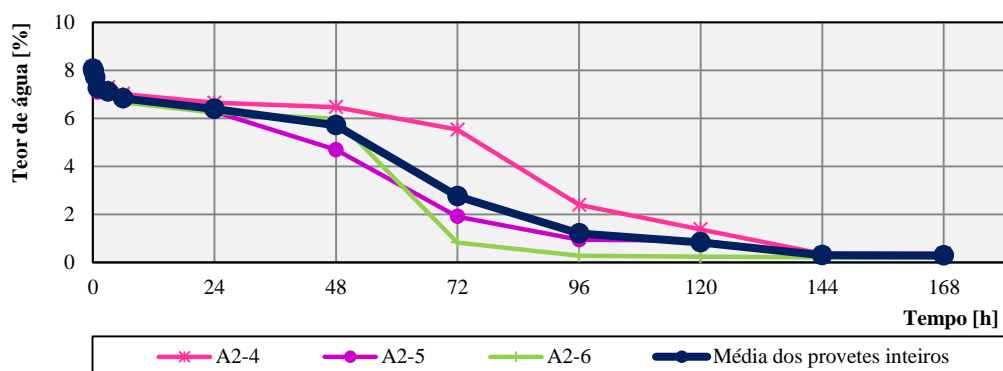


Figura I.23 – Curvas de secagem dos provetes A2-4 a A2-6 (provetes inteiros)

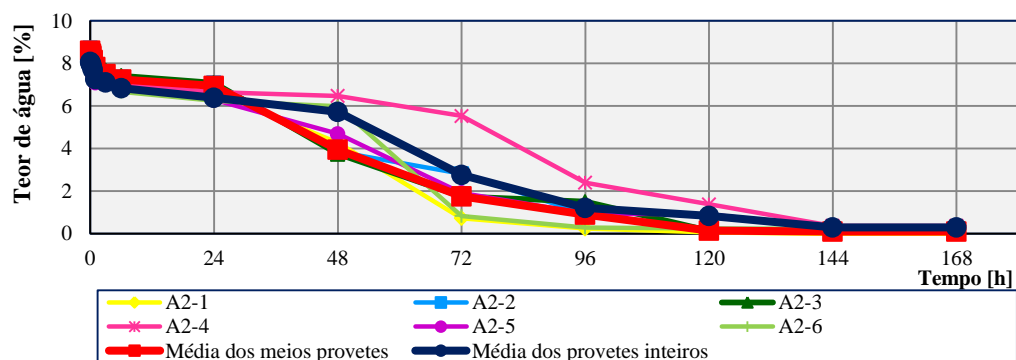
Tabela I.42 – Resultados da taxa de secagem dos provetes A2-4 a A2-6 (provetes inteiros)

Provetes	Taxa de secagem [kg/m <sup>2</sup> .h]
A3-4	0,634
A3-5	0,657
A3-6	0,810
Média	0,700
Desvio Padrão	0,096

Tabela I.43 – Resultados do índice de secagem dos provetes A2-4 a A2-6 (provetes inteiros)

Tempo [horas]	Provetes					
	A2-4		A2-5		A2-6	
	Qi	Ai <sup>(1)</sup>	Qi	Ai <sup>(1)</sup>	Qi	Ai <sup>(1)</sup>
0	8,14	-	8,02	-	8,02	-
0,08	8,10	0,68	7,97	0,67	7,97	0,67
0,17	8,08	0,67	7,93	0,66	7,92	0,66
0,25	8,01	0,67	7,85	0,66	7,83	0,66
0,50	7,86	1,98	7,67	1,94	7,61	1,93
1	7,50	3,84	7,08	3,69	7,18	3,70
3	7,29	14,79	7,07	14,15	6,97	14,15
6	7,02	21,46	6,83	20,86	6,66	20,45
24	6,65	123,01	6,28	118,00	6,23	116,05
48	6,47	157,44	4,69	131,56	5,98	146,57
72	5,53	143,96	1,91	79,15	0,83	81,75
96	2,39	95,02	0,94	34,21	0,28	13,36
120	1,37	45,18	0,90	22,14	0,23	6,20
144	0,36	20,83	0,30	14,39	0,22	5,38
168	0,36	8,65	0,29	7,04	0,21	5,12
Somatório	-	638,19	-	449,12	-	416,64
Área Total	1680					
Índice de Secagem	Indiv.	0,38	0,27		0,25	
	Média	0,298				
	DP	0,071				

$$^{(1)} A_i = \frac{Q_i + Q_{i+2}}{2} \times (t_{i+1} - t_i)$$



Argamassa	Provetes nº	Composição ponderal
A2	A2-1a A2-6	1 : 0,5 : 4,5 Ca : CVC : AN

Ca – cal aérea; CVC – cinzas volantes conformes; AN – areia normalizada

Figura I.24 – Curvas secagem dos provetes A2-1 a A2-6

Tabela I.44 – Registos das massas durante o ensaio e resultados do teor de água dos provetes A3-1a A3-3 (“meios provetes”)

Data	Tempo	Massa provetes, Mi [g]	Teor de água, Qi [%]						
			Individuais						Média
Ensaio	[horas]	A3-1	A3-2	A3-3	A3-1	A3-2	A3-3	A3-1aA3-3	
10-Jul	0 min	0	286,952	266,061	321,888	11,04	9,33	9,48	10,0
	5 min	0,08	281,694	265,827	321,650	9,01	9,23	9,40	9,2
	10 min	0,17	281,532	264,728	321,450	8,95	8,78	9,33	9,0
	15min	0,25	281,268	265,519	321,254	8,84	9,10	9,27	9,1
	30 min	0,50	280,640	265,090	320,768	8,60	8,93	9,10	8,9
	1 hora	1	279,399	264,195	319,852	8,12	8,56	8,79	8,5
	3 horas	3	278,673	263,665	319,309	7,84	8,34	8,60	8,3
	6 horas	6	277,666	262,941	318,518	7,45	8,04	8,34	7,9
11-Jul	1dia	24	276,392	261,999	317,588	6,96	7,66	8,02	7,5
12-Jul	2dias	48	275,701	261,498	317,137	6,69	7,45	7,87	7,3
13-Jul	3dias	72	268,87	254,20	308,29	4,04	4,45	4,86	4,5
14-Jul	4dias	96	259,75	249,41	300,56	0,52	2,48	2,23	1,7
15-Jul	5dias	120	258,48	244,38	295,34	0,03	0,42	0,45	0,3
16-Jul	6dias	144	258,35	244,37	295,20	-0,02	0,41	0,40	0,3
17-Jul	7dias	168	258,32	244,360	295,18	-0,04	0,41	0,40	0,3

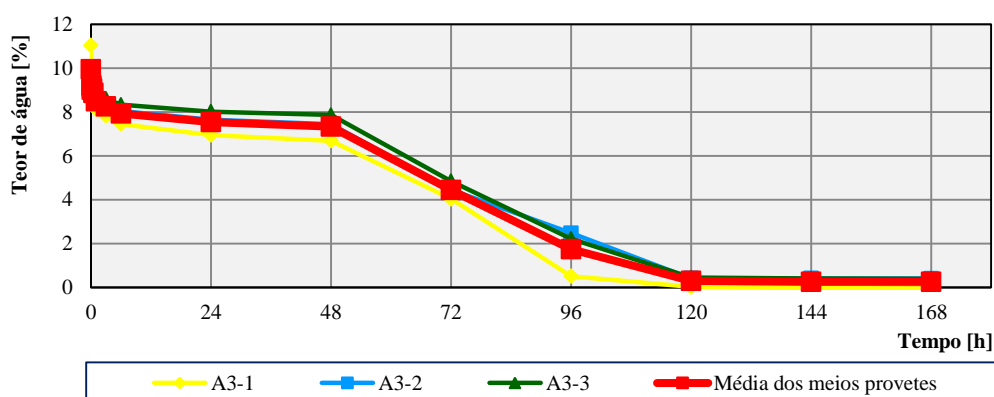


Figura I.25 – Curvas de secagem dos provetes A3-1 a A3-3 (“meios provetes”)

Tabela I.45 – Resultados da taxa de secagem dos provetes A3-1 a A3-3 (“meios provetes”)

Provetes	Taxa de secagem [kg/m <sup>2</sup> .h]
A3-1	1,930
A3-2	0,652
A3-3	0,679
Média	1,087
Desvio Padrão	0,731

Tabela I.46 – Resultados do índice de secagem dos provetes A3-1 a A3-3 (“meios provetes”)

Tempo [horas]	Provetes					
	A3-1		A3-2		A3-3	
	Qi	Ai <sup>(1)</sup>	Qi	Ai <sup>(1)</sup>	Qi	Ai <sup>(1)</sup>
0	11,04	-	9,33	-	9,48	-
0,08	9,01	0,84	9,23	0,77	9,40	0,79
0,17	8,95	0,75	8,78	0,75	9,33	0,78
0,25	8,84	0,74	9,10	0,75	9,27	0,77
0,50	8,60	2,18	8,93	2,25	9,10	2,30
1	8,12	4,18	8,56	4,37	8,79	4,47
3	7,84	15,96	8,34	16,90	8,60	17,39
6	7,45	22,93	8,04	24,58	8,34	25,41
24	6,96	129,66	7,66	141,30	8,02	147,18
48	6,69	163,76	7,45	181,28	7,87	190,61
72	4,04	128,81	4,45	142,85	4,86	152,65
96	0,52	54,73	2,48	83,24	2,23	85,00
120	0,03	6,50	0,42	34,80	0,45	32,15
144	-0,02	0,01	0,41	9,95	0,40	10,27
168	-0,04	-0,73	0,41	9,85	0,40	9,62
Somatório	-	530,32	-	653,63	-	679,39
Área Total	1680					
Índice de Secagem	Índiv.	0,32	0,39		0,40	
	Média	0,370				
	DP	0,047				

$$^{(1)} A_i = \frac{Q_i + Q_{i+2}}{2} \times (t_{i+1} - t_i)$$

Tabela I.47 – Registos das massas durante o ensaio e resultados do teor de água dos provetes A3-4 a A3-6 (provetes inteiros)

Data	Tempo	Massa provetes, Mi [g]				Teor de água, Qi [%]			
Ensaio	[horas]	A3-4	A3-5	A3-6	A3-4	A3-5	A3-6	A3-4aA3-6	
11-Jul	0 min	0	525,446	531,175	530,493	9,26	9,13	9,28	9,2
	5 min	0,08	525,208	530,941	530,231	9,21	9,08	9,23	9,2
	10 min	0,17	525,048	530,833	529,999	9,18	9,06	9,18	9,1
	15min	0,25	524,738	530,403	529,554	9,11	8,97	9,09	9,1
	30 min	0,5	523,968	529,638	528,692	8,95	8,82	8,91	8,9
	1 hora	1	522,426	528,026	526,591	8,63	8,49	8,48	8,5
	3 horas	3	521,514	526,129	525,461	8,44	8,10	8,24	8,3
	6 horas	6	520,274	525,089	524,006	8,18	7,88	7,94	8,0
12-Jul	1dia	24	518,807	524,333	521,993	7,88	7,73	7,53	7,7
13-Jul	2dias	48	518,031	523,779	520,913	7,72	7,61	7,31	7,5
14-Jul	3dias	72	507,36	518,57	503,81	5,50	6,54	3,78	5,3
15-Jul	4dias	96	499,00	508,39	492,12	3,76	4,45	1,37	3,2
16-Jul	5dias	120	494,00	495,97	492,12	2,72	1,90	1,37	2,0
17-Jul	6dias	144	483,34	489,16	485,87	0,50	0,50	0,09	0,4
18-Jul	7dias	168	483,32	489,14	485,85	0,50	0,50	0,08	0,4

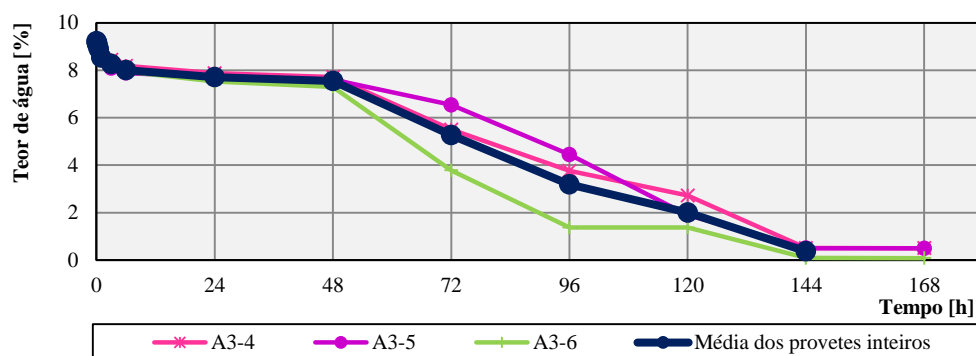


Figura I.26 – Curvas de secagem dos provetes A3-4 a A3-6 (provetes inteiros)

Tabela I.48 – Resultados da taxa de secagem dos provetes A3-4 a A3-6 (provetes inteiros)

Provetes	Taxa de secagem [kg/m <sup>2</sup> .h]
A3-4	0,634
A3-5	0,657
A3-6	0,810
Média	0,700
Desvio Padrão	0,096

Tabela I.49 – Resultados do índice de secagem dos provetes A3-4 a A3-6 (provetes inteiros)

Tempo [horas]	Provetes					
	A3-4		A3-5		A3-6	
	Qi	Ai <sup>(1)</sup>	Qi	Ai <sup>(1)</sup>	Qi	Ai <sup>(1)</sup>
0	9,26	-	9,13	-	9,28	-
0,08	9,21	0,77	9,08	0,76	9,23	0,77
0,17	9,18	0,77	9,06	0,76	9,18	0,77
0,25	9,11	0,76	8,97	0,75	9,09	0,76
0,50	8,95	2,26	8,82	2,22	8,91	2,25
1	8,63	4,40	8,49	4,33	8,48	4,35
3	8,44	17,07	8,10	16,58	8,24	16,72
6	8,18	24,94	7,88	23,97	7,94	24,28
48	7,72	187,17	7,61	184,08	7,31	
72	5,50	158,60	6,54	169,87	3,78	133,06
96	3,76	111,12	4,45	131,92	1,37	61,88
120	2,72	77,80	1,90	76,20	1,37	32,98
144	0,50	38,72	0,50	28,79	0,09	17,54
168	0,50	12,06	0,50	11,96	0,08	2,04
Somatório	-	781,01	-	792,66	-	614,65
Área total	1680					
Índice de Secagem	Indiv.	0,46	0,47		0,37	
	Média		0,434			
	DP		0,059			

$$^{(1)} A_i = \frac{Q_i + Q_{i+2}}{2} \times (t_{i+1} - t_i)$$



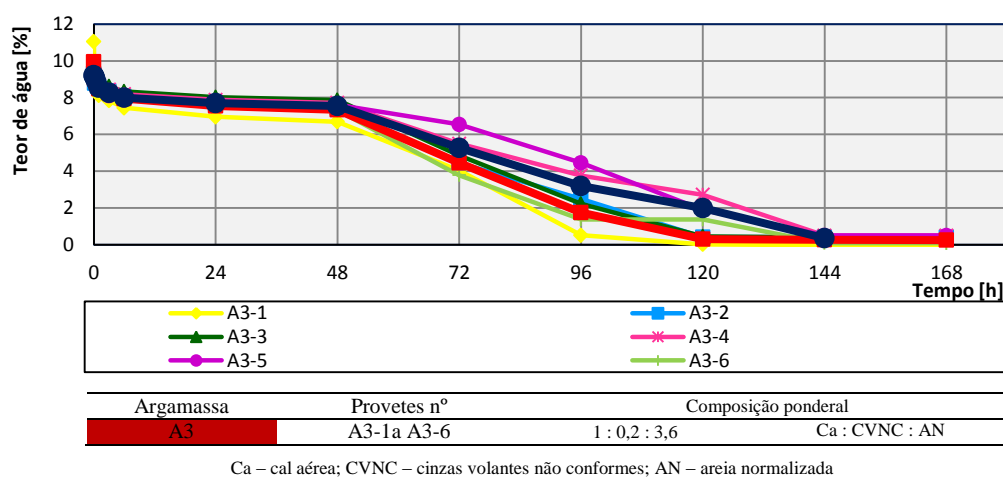


Figura I.27 – Curvas de secagem dos provetes A3-1 a A3-6

Tabela I.50 – Registos das massas durante o ensaio e resultados do teor de água dos provetes A4-1 a A4-3 (“meios provetes”)

Data	Tempo	Massa provetes, Mi [g]			Teor de água, Qi [%]				
Ensaio	[horas]	A4-1	A4-2	A4-3	A4-1	A4-2	A4-3	A4-1aA4-3	
10-Jul	0 min	0	272,483	270,335	255,384	8,66	8,95	8,95	8,9
	5 min	0,08	272,186	270,099	255,166	8,54	8,85	8,86	8,8
	10 min	0,17	271,919	269,910	255,010	8,43	8,78	8,79	8,7
	15min	0,25	271,728	269,734	254,901	8,36	8,71	8,75	8,6
	30 min	0,50	271,322	268,572	254,060	8,19	8,24	8,39	8,3
	1 hora	1	270,024	268,315	253,922	7,68	8,14	8,33	8,0
	3 horas	3	269,426	267,767	253,497	7,44	7,91	8,15	7,8
	6 horas	6	268,607	267,119	252,979	7,11	7,65	7,93	7,6
11-Jul	1dia	24	267,505	266,241	252,288	6,67	7,30	7,63	7,2
12-Jul	2dias	48	266,889	265,725	251,962	6,43	7,09	7,49	7,0
13-Jul	3dias	72	255,97	259,42	245,02	2,07	4,55	4,53	3,7
14-Jul	4dias	96	253,60	250,39	241,02	1,13	0,91	2,83	1,6
15-Jul	5dias	120	251,65	249,83	235,60	0,35	0,69	0,51	0,5
16-Jul	6dias	144	251,63	249,25	235,59	0,34	0,45	0,51	0,4
17-Jul	7dias	168	251,62	249,24	235,59	0,34	0,45	0,51	0,4

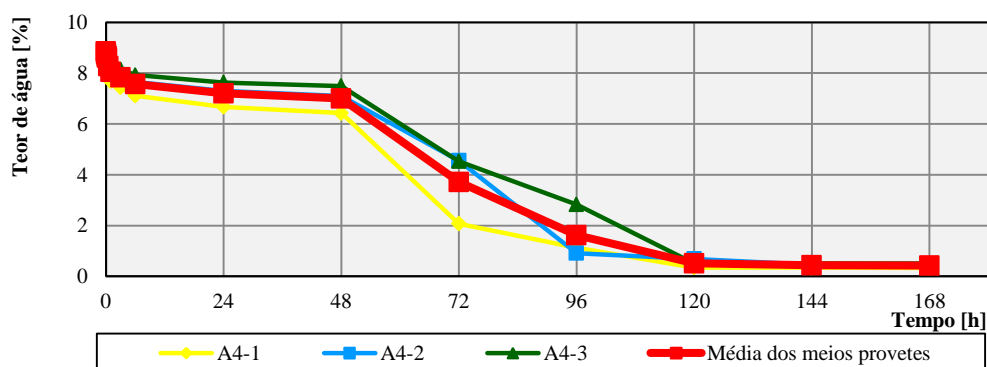


Figura I.28 – Curvas de secagem dos provetes A4-1 a A4-3 (“meios provetes”)

Tabela I.51 – Resultados da taxa de secagem dos provetes A4-1 a A4-3 (“meios provetes”)

Provetes	Taxa de secagem [kg/m <sup>2</sup> .h]
A4-1	0,939
A4-2	0,865
A4-3	0,865
Média	0,818
Desvio Padrão	0,145

Tabela I.52 – Resultados do índice de secagem dos provetes A4-1a A4-3 (“meios provetes”)

Tempo [horas]		Provetes					
		A4-1		A4-1		A4-1	
		Qi	Ai <sup>(1)</sup>	Qi	Ai <sup>(1)</sup>	Qi	Ai <sup>(1)</sup>
0		8,66	-	8,95	-	8,95	-
0,08		8,54	0,72	8,85	0,74	8,86	0,74
0,17		8,43	0,71	8,78	0,73	8,79	0,74
0,25		8,36	0,70	8,71	0,73	8,75	0,73
0,50		8,19	2,07	8,24	2,12	8,39	2,14
1		7,68	3,97	8,14	4,09	8,33	4,18
3		7,44	15,11	7,91	16,05	8,15	16,48
6		7,11	21,82	7,65	23,35	7,93	24,11
24		6,67	124,05	7,30	134,58	7,63	140,03
48		6,43	157,18	7,09	172,70	7,49	181,51
72		2,07	101,99	4,55	139,73	4,53	144,31
96		1,13	38,38	0,91	65,56	2,83	88,31
120		0,35	17,71	0,69	19,17	0,51	40,07
144		0,34	8,30	0,45	13,66	0,51	12,26
168		0,34	8,15	0,45	10,80	0,51	12,20
Somatório		-	500,87	-	604,03	-	667,82
Área total		1680					
Índice de Secagem	Indiv.	0,30		0,36		0,40	
	Média	0,352					
	DP	0,050					

$$^{(1)} A_i = \frac{Q_i + Q_{i+2}}{2} \times (t_{i+1} - t_i)$$

Tabela I.53 – Registos das massas durante o ensaio de secagem e resultados do teor de água dos provetes

A4-4a A4-6 (provetes inteiros)

Data	Tempo	Massa provetes, Mi [g]	Teor de água, Qi [%]						
			Individuais			Média			
Ensaio	[horas]	A4-4	A4-5	A4-6	A4-4	A4-5	A4-6	A4-4aA4-6	
11-Jul	0 min	0	541,458	538,255	538,154	8,61	8,76	8,57	8,6
	5 min	0,08	541,260	538,039	537,907	8,57	8,71	8,52	8,6
	10 min	0,17	540,900	537,880	537,646	8,50	8,68	8,47	8,5
	15min	0,25	540,743	537,523	537,210	8,46	8,61	8,38	8,5
	30 min	0,5	538,798	536,998	535,791	8,07	8,50	8,09	8,2
	1 hora	1	538,422	535,171	534,305	8,00	8,14	7,79	8,0
	3 horas	3	537,384	534,152	533,048	7,79	7,93	7,54	7,8
	6 horas	6	536,222	532,942	531,430	7,56	7,68	7,21	7,5

Tabela I.53 – Registos das massas durante o ensaio de secagem e resultados do teor de água dos provetes  
A4-4a A4-6 (provetes inteiros) (continuação)

Data	Tempo	Massa provetes, Mi [g]	Teor de água, Qi [%]						
			Individuais						Média
Ensaio	[horas]	A4-4	A4-5	A4-6	A4-4	A4-5	A4-6	A4-4aA4-6	
12-Jul	1dia	24	534,571	531,317	529,207	7,23	7,36	6,76	7,1
13-Jul	2dias	48	533,758	530,478	528,058	7,06	7,19	6,53	6,9
14-Jul	3dias	72	524,29	526,33	520,19	5,16	6,35	4,95	5,5
15-Jul	4dias	96	511,93	506,63	501,82	2,68	2,37	1,24	2,1
16-Jul	5dias	120	501,59	497,79	497,70	0,61	0,58	0,41	0,5
17-Jul	6dias	144	501,50	497,70	497,64	0,59	0,56	0,40	0,5
18-Jul	7dias	168	501,46	497,68	497,62	0,58	0,56	0,39	0,5

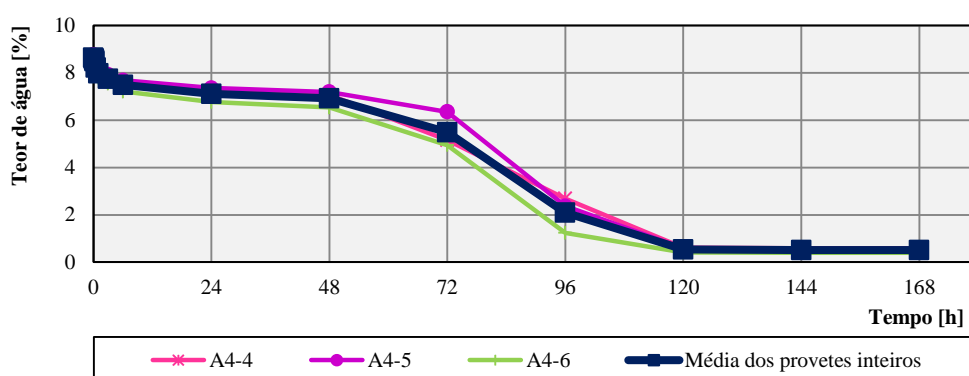


Figura I.29 – Curvas de secagem dos provetes A4-4 a A4-6 (provetes inteiros)

Tabela I.54 – Resultados da taxa de secagem dos provetes A4-4 a A4-6 (provetes inteiros)

Provetes	Taxa de secagem [kg/m <sup>2</sup> .h]
A4-4	0,668
A4-5	0,620
A4-6	0,811
Média	0,699
Desvio Padrão	0,100

Tabela I.55 – Resultados do índice de secagem dos provetes A4-4a A4-6 (provetes inteiros)

Tempo [horas]	Provetes					
	A4-4		A4-5		A4-6	
	Qi	Ai <sup>(1)</sup>	Qi	Ai <sup>(1)</sup>	Qi	Ai <sup>(1)</sup>
0	8,61	-	8,76	-	8,57	-
0,08	8,57	0,72	8,71	0,73	8,52	0,71
0,17	8,50	0,71	8,68	0,72	8,47	0,71
0,25	8,46	0,71	8,61	0,72	8,38	0,70
0,50	8,07	2,07	8,50	2,14	8,09	2,06
1	8,00	4,02	8,14	4,16	7,79	3,97
3	7,79	15,79	7,93	16,06	7,54	15,33
6	7,56	23,02	7,68	23,42	7,21	22,13
24	7,23	133,04	7,36	135,37	6,76	125,80

Tabela I.55 – Resultados do índice de secagem dos provetes A4-4a A4-6 (provetes inteiros) (continuação)

Tempo [horas]	Provetes					
	A4-4		A4-5		A4-6	
	Qi	Ai <sup>(1)</sup>	Qi	Ai <sup>(1)</sup>	Qi	Ai <sup>(1)</sup>
48	7,06	171,46	7,19	174,52	6,53	159,57
72	5,16	146,70	6,35	162,43	4,95	137,74
96	2,68	94,16	2,37	104,61	1,24	74,22
120	0,61	39,53	0,58	35,41	0,41	19,77
144	0,59	14,43	0,56	13,75	0,40	9,65
168	0,58	14,11	0,56	13,49	0,39	9,46
Somatório	-	660,45	-	687,53	-	581,81
Área total			1680			
Índice de Secagem	Indiv.	0,39		0,41		0,35
	Média	0,383				
	DP	0,033				

$$^{(1)} A_i = \frac{Q_i + Q_{i+2}}{2} \times (t_{i+1} - t_i)$$

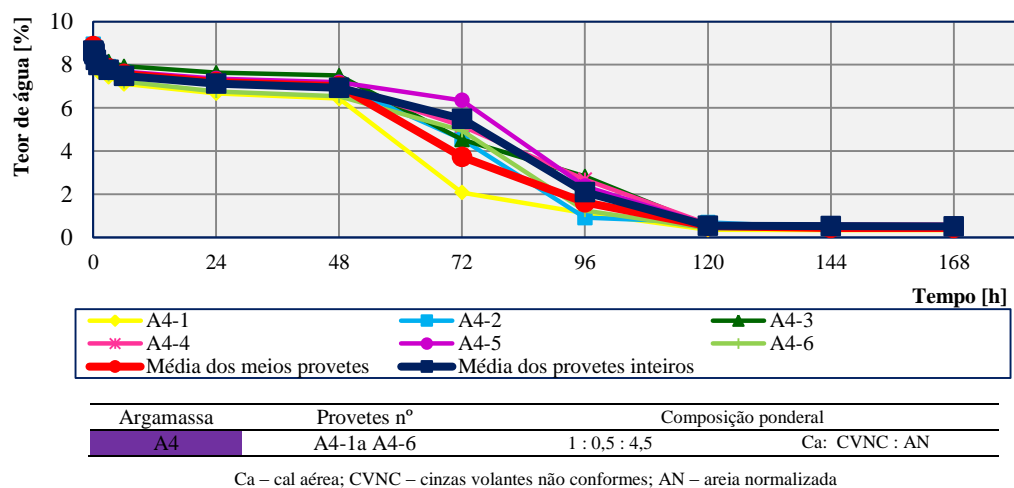


Figura I.30 – Curvas de secagem dos provetes A4-1 a A4-6

**Massa volúmica real, massa volúmica aparente e porosidade aberta**

Na tabela I.56 apresentam-se os valores da massa volúmica real (MVR), massa volúmica aparente (MVA) e porosidade aberta (%) aos 116 dias obtidos pelos provetes do tipo Ai-1 a Ai-3.

Tabela I.56 – Resultados do ensaio das massas volúmicas (real e aparente) e porosidade aberta

Arg.	Nº	M <sub>1</sub> [g]	M <sub>2</sub> [g]	M <sub>3</sub> [g]	MVR [kg/m <sup>3</sup> ]			MVA [kg/m <sup>3</sup> ]			PA [%]		
					Indiv.	Média	DP	Indiv.	Média	DP	Indiv.	Média	DP
A0	A0-1	55,7	32,6	62,2	2409,3			1879,9			22,0		
	A0-2	65,8	38,3	73,4	2391,4			1875,0			21,6		
		58,4	34,0	65,2	2392,4	2398,5	9,9	1871,8	1880,2	8,0	21,8	21,6	0,3
		52,1	30,3	58,0	2390,1			1881,4			21,3		
	A0-3	53,9	31,6	60,0	2409,3			1892,8			21,4		

Tabela I.56 – Resultados do ensaio das massas volúmicas (real e aparente) e porosidade aberta  
(continuação)

Arg.	Nº	M <sub>1</sub> [g]	M <sub>2</sub> [g]	M <sub>3</sub> [g]	MVR [kg/m³]			MVA [kg/m³]			PA [%]		
					Indiv.	Média	DP	Indiv.	Média	DP	Indiv.	Média	DP
A1	A1-1	78,3	46,0	85,9	2425,7			1962,6			19,1		
		74,1	43,6	81,3	2434,0			1968,4			19,1		
	A1-2	77,3	45,4	85,4	2426,2	2430,0	4,7	1933,7	1957,5	12,9	20,3	19,4	0,5
		69,5	41,0	76,4	2437,0			1966,8			19,3		
	A1-3	96,3	56,6	105,9	2426,5			1952,6			19,5		
		56,7	33,4	62,3	2430,5			1960,9			19,3		
A2	A2-1	149,9	87,7	163,4	2409,9			1978,7			17,9		
	A2-2	75,8	44,6	82,9	2427,4	2416,9	9,3	1979,1	1975,1	6,6	18,5	18,3	0,3
	A2-3	155,2	90,9	169,8	2413,4			1967,5			18,5		
A3	A3-1	147,6	86,2	162,7	2405,0			1928,7			19,8		
	A3-2	65,6	38,7	72,5	2439,4	2422,2	24,3	1945,3	1937,0	11,7	20,3	20,0	0,3
	A33 (1)	42,1	24,6	42,6	2401,4			2344,7			2,4		
A4	A4-1	72,0	42,5	79,0	2441,3			1974,0			19,1		
	A4-2	59,7	35,4	66,2	2456,4	2454,1	11,8	1939,3	1957,5	17,4	21,1	20,2	1,0
	A4-3	36,0	21,4	39,8	2464,6			1959,3			20,5		

(1) Valores desprezados no cálculo das médias e dos desvios padrões.

## 4.2. Características mecânicas

### Módulo de elasticidade dinâmico

Nas tabelas I.57 e I.58 representam-se os valores obtidos (individuais, médios e desvio padrão) no presente ensaio aos 90 dias e aos 111 dias (após o contacto com a água), respectivamente.

Tabela I.57 – Resultados do ensaio do módulo de elasticidade dinâmico após os 90 dias

Argamassa	Nº	Massa [g]	E <sub>din</sub> [MPa]					Média das argamassas	DP
			Fases (leituras)						
			Individual			Média			
A0	A0-1	469,93	1604	1563	1646	1736	1637,3	3318,3	2903,3
	A0-2	472,14	5963	7427	6654	6639	6670,8		
	A0-3	469,84	1435	1863	1876	1414	1647,0		
A1	A1-1	487,75	7509	7491	7583	7527	7527,5	7405,0	175,1
	A1-2	487,82	7180	7214	7208	7216	7204,5		
	A1-3	490,84	7453	7458	7515	7506	7483,0		
A2	A2-1	500,43	8573	8484	8604	8546	8551,8	8056,0	432,5
	A2-2	499,31	7888	7892	7833	7829	7860,5		
	A2-3	499,53	7770	7729	7755	7769	7755,8		
A3	A3-1	482,74	6036	5884	5877	6013	5952,5	5594,9	342,0
	A3-2	480,35	5544	5562	5574	5565	5561,3		
	A3-3	482,59	5300	5270	5223	5291	5271,0		
A4	A4-1	501,63	7632	7545	7615	7641	7608,3	7416,1	176,4
	A4-2	499,46	7607	7276	7319	7312	7378,5		
	A4-3	498,87	7258	7226	7261	7301	7261,5		

Tabela I.58 – Resultados do ensaio do módulo de elasticidade dinâmico após o contacto com a água

Argamassa	Nº	Massa [g]	E <sub>din</sub> [MPa]						Média das argamassas	DP
			Fases (leituras)							
			Individual			Média				
A0	B0-4	464,90	5441	5606	5573	5580	5550,0	5639,8	80,04	
	B0-5	465,68	5692	5721	5688	5714	5703,8			
	B0-6	470,40	5630	5648	5702	5682	5665,5			
A1	B1-4	489,86	8111	8048	8090	8108	8089,3	7726,7	349,79	
	B1-5	486,08	7440	7361	7387	7377	7391,3			
	B1-6	491,63	7708	7670	7703	7717	7699,5			
A2	B2-4	498,29	9514	9534	9526	9564	9534,5	9509,4	26,91	
	B2-5	504,29	9641	9343	9527	9540	9512,8			
	B2-6	504,60	9458	9479	9502	9485	9481,0			
A3	B3-4	481,10	7514	7506	7490	7517	7506,8	7363,8	151,50	
	B3-5	487,07	7208	7218	7193	7201	7205,0			
	B3-6	485,46	7357	7369	7403	7390	7379,8			
A4	B4-4	498,53	8288	8317	8291	8325	8305,3	8130,6	291,56	
	B4-5	495,00	7759	7830	7786	7801	7794,0			
	B4-6	494,93	8300	8283	8309	8278	8292,5			

**Resistência à tracção por flexão e resistência à compressão**

Nas tabelas I.59 e I.60 indicam-se os valores obtidos (força máxima; resistência individual, média e desvio padrão) no ensaio de resistência à tracção por flexão aos 90 dias e aos 111 dias (após o contacto com a água).

Nas tabelas I.61, I.62 e I.63 apresentam-se os valores obtidos (força máxima; resistência individual, média e desvio padrão) no ensaio de resistência à compressão. As tabelas I.61 e I.62 correspondem a um dos “meios provetes” do tipo Ai-1 a Ai-3 (resultantes do ensaio de resistência à tracção por flexão) que foram ensaiados aos 90 dias e aos 111 dias (após o ensaio de secagem, logo do tipo Bi-1 a Bi-3), respectivamente. A tabela I.63 representa os dois “meios provetes” do tipo Bi-4 a Bi-6 que foram submetidos a este ensaio aos 111 dias, após o ensaio de secagem.

Tabela I.59 – Resultados do ensaio da resistência à tracção por flexão aos 90 dias

Argamassas	Nº	Massa [g]	F <sub>max</sub> [N]	R <sub>f</sub> [MPa]	R <sub>f</sub> média [MPa]	DP [MPa]
A0	A0-1	469,93	36,1	0,1	0,2	0,1
	A0-2	472,14	132,2	0,3		
	A0-3	469,84	36,4	0,1		
A1	A1-1	487,75	243,5	0,6	0,7	0,1
	A1-2	487,82	282,2	0,7		
	A1-3	490,84	334,0	0,8		
A2	A2-1	500,43	379,1	0,9	0,7	0,2
	A2-2	499,31	352,8	0,8		
	A2-3	499,53	221,5	0,5		

Tabela I.59 – Resultados do ensaio da resistência à tracção por flexão aos 90 dias (continuação)

Argamassas	Nº	Massa [g]	F <sub>max</sub> [N]	R <sub>f</sub> [MPa]	R <sub>f</sub> média [MPa]	DP [MPa]
<b>A3</b>	A3-1	482,74	188,8	0,4	0,5	0,1
	A3-2	480,35	264,2	0,6		
	A3-3	482,59	218,0	0,5		
<b>A4</b>	A4-1	501,63	332,5	0,8	0,8	0,0
	A4-2	499,46	332,0	0,8		
	A4-3	498,87	315,5	0,7		

Tabela I.60 – Resultados do ensaio da resistência à tracção por flexão aos 111 dias

Argamassas	Nº	Massa [g]	F <sub>max</sub> [N]	R <sub>f</sub> [MPa]	R <sub>f</sub> média [MPa]	DP [MPa]
<b>A0</b>	B0-4	464,90	154,3	0,36	0,4	0,04
	B0-5	465,68	183,0	0,43		
	B0-6	470,40	175,9	0,41		
<b>A1</b>	B1-4	489,86	275,8	0,65	0,6	0,04
	B1-5	486,08	255,0	0,60		
	B1-6	491,63	243,2	0,57		
<b>A2</b>	B2-4	498,29	342,4	0,80	0,8	0,06
	B2-5	504,29	301,9	0,71		
	B2-6	504,60	348,6	0,82		
<b>A3</b>	B3-4	481,10	251,3	0,59	0,6	0,07
	B3-5	487,07	256,9	0,60		
	B3-6	485,46	303,5	0,71		
<b>A4</b>	B4-4	498,53	341,3	0,80	0,8	0,04
	B4-5	495,00	310,0	0,73		
	B4-6	494,93	338,4	0,79		

Tabela I.61 – Resultados do ensaio da resistência à compressão aos 90 dias (“meios provetes”)

Argamassas	Nº	F <sub>max</sub> [N]	R <sub>c</sub> [MPa]	R <sub>c</sub> média [MPa]	DP [MPa]
<b>A0</b>	A0-1	1333	0,8	0,9	0,03
	A0-2	1356	0,8		
	A0-3	1418	0,9		
<b>A1</b>	A1-1	2321	1,5	1,1	0,4
	A1-2	952	0,6		
	A1-3	1904,5	1,2		
<b>A2</b>	A2-1	1950,5	1,2	1,3	0,1
	A2-2	1999	1,2		
	A2-3	2280	1,4		
<b>A3</b>	A3-1	1400	0,9	0,9	0,0
	A3-2	1440	0,9		
	A3-3	1340	0,8		
<b>A4</b>	A4-1	1600	1,0	0,9	0,2
	A4-2	1781	1,1		
	A4-3	1120	0,7		

Tabela I.62 – Resultados do ensaio da resistência à compressão aos 111 dias (“meio provete”)

Argamassas	Nº	F <sub>max</sub> [N]	R <sub>c</sub> [MPa]	R <sub>c</sub> média [MPa]	DP [MPa]
A0	B0-1	1345	0,8	0,9	0,04
	B0-2	1443	0,9		
	B0-3	1345	0,8		
A1	B1-1	1554	1,0	1,2	0,28
	B1-2	2350	1,5		
	B1-3	1625	1,0		
A2	B2-1	2653	1,7	1,5	0,16
	B2-2	2160	1,4		
	B2-3	2352	1,5		
A3	B3-1	1830	1,1	1,2	0,05
	B3-2	1980	1,2		
	B3-3	1860	1,2		
A4	B4-1	3330	2,1	1,7	0,43
	B4-2	2668	1,7		
	B4-3	1940	1,2		

Tabela I.63 – Resultados do ensaio da resistência à compressão aos 111 dias (2 “meios provetes”)

Argamassas	Nº	F <sub>max</sub> [N]	R <sub>c</sub> [MPa]	R <sub>c</sub> média [MPa]	DP [MPa]
A0	B0-4	B0-4a	1708,5	1,1	0,08
		B0-4b	1868,5	1,2	
	B0-5	B0-5a	1563,2	1,0	
		B0-5b	1691,5	1,1	
	B0-6	B0-6a	1677,1	1,0	
		B0-6b	1419,0	0,9	
A1	B1-4	B1-4a	2160,9	1,4	0,29
		B1-4b	2400,0	1,5	
	B1-5	B1-5a	1510,5	0,9	
		B1-5b	1535,5	1,0	
	B1-6	B1-6a	2530,0	1,6	
		B1-6b	2160,9	1,4	
A2	B2-4	B2-4a	2379,0	1,5	0,31
		B2-4b	2066,6	1,3	
	B2-5	B2-5a	2610,0	1,6	
		B2-5b	2591,5	1,6	
	B2-6	B2-6a	3012,0	1,9	
		B2-6b	3390,0	2,1	
A3	B3-4	B3-4a	1630,8	1,0	0,22
		B3-4b	1560,8	1,0	
	B3-5	B3-5a	2097,0	1,3	
		B3-5b	1768,0	1,1	
	B3-6	B3-6a	2269,0	1,4	
		B3-6b	2335,0	1,5	



Tabela I.63 – Resultados do ensaio da resistência à compressão aos 111 dias (2 “meios provetes”)  
(continuação)

Argamassas	Nº	F <sub>max</sub> [N]	R <sub>c</sub> [MPa]	R <sub>c</sub> média [MPa]	DP [MPa]		
A4	B4-4	B4-4a	2855,0	1,8	1,5	0,09	
		B4-4b	1880,0	1,2			
	B4-5	B4-5a	2790,8	1,7	1,3		1,4
		B4-5b	1371,0	0,9			
	B4-6	B4-6a	2883,0	1,8	1,4		
		B4-6b	1585,0	1,0			

### Aderência ao suporte

Na tabela I.64 apresentam-se os valores obtidos no ensaio de aderência ao suporte realizado nos cinco provetes.

Tabela I.64 – Resultados do ensaio de aderência ao suporte

Argam.	Prov.	Tensão [N/mm²]	A <sub>0</sub> [mm²]	F [N]	A [mm]	B [mm]	A <sub>□</sub> [mm²]	σ <sub>a</sub> [MPa]	σ' <sub>a</sub> média [MPa]	DP [MPa]
<b>A0</b>	A <sub>d</sub> 0-1	0,25	1963	490,75	49,78	45,78	2278,9	0,22	0,21	0,020
	A <sub>d</sub> 0-2	0,26		510,38	45,58	49,58	2259,9	0,23		
	A <sub>d</sub> 0-3	0,23		451,49	50,44	47,65	2403,5	0,19		
<b>A1</b>	A <sub>d</sub> 1-1	0,23		451,49	50,92	50,94	2593,9	0,17	0,18	0,007
	A <sub>d</sub> 1-2	0,25		490,75	51,09	51,3	2620,9	0,19		
	A <sub>d</sub> 1-3	0,23		451,49	48,27	50,85	2454,5	0,18		
<b>A2</b>	A <sub>d</sub> 2-1	-		-	-	-	-	-	0,16	0,007
	A <sub>d</sub> 2-2	0,23		451,49	54,89	51,98	2853,2	0,16		
	A <sub>d</sub> 2-3	0,22		431,86	50,20	50,98	2559,2	0,17		
<b>A3</b>	A <sub>d</sub> 3-1	-		-	-	-	-	-	0,19	0,001
	A <sub>d</sub> 3-2	0,24		471,12	47,71	52,75	2516,7	0,19		
	A <sub>d</sub> 3-3	0,23		451,49	48,32	50,18	2424,7	0,19		
<b>A4</b>	A <sub>d</sub> 4-1	0,23		451,49	48,32	50,18	2424,7	0,19	0,16	0,015
	A <sub>d</sub> 4-2	0,22		451,49	52,60	53,86	2833,0	0,16		
	A <sub>d</sub> 4-3	0,23		431,86	54,49	53,34	2906,5	0,15		